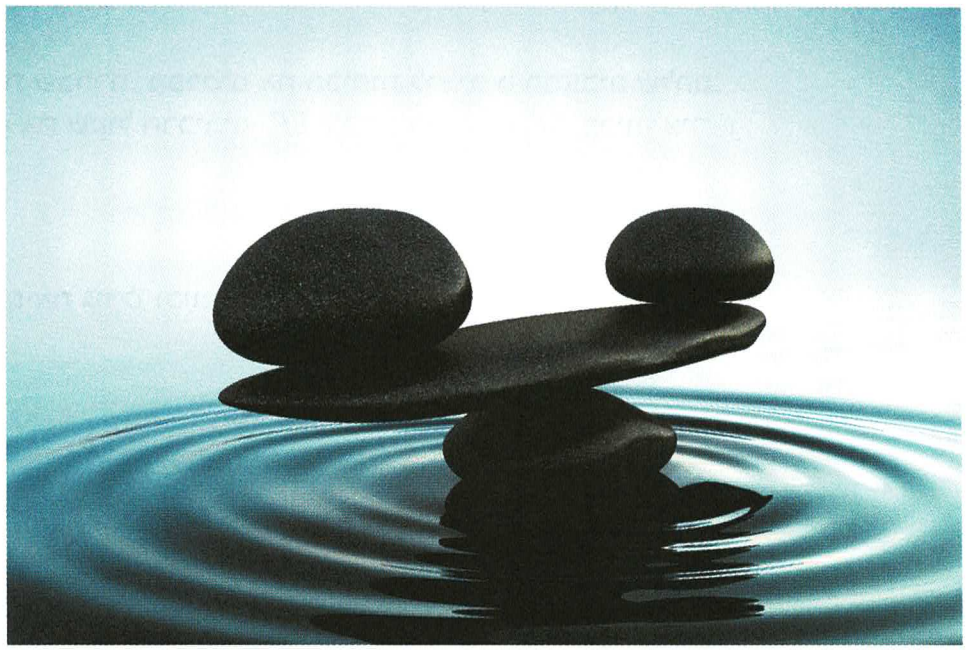
פרק 6 – החוק הראשון של ניוטון



בפרק זה נלמד את החוק הראשון של ניוטון, את שימושיו ונעסוק בפתרון בעיות פיזיקליות הקשורות בו.

חוק זה היה ידוע לפני תקופת ניוטון. הפיזיקאי והמתמטיקאי גלילאו גליליי דיבר על חוק זה והסביר באמצעותו מספר תופעות פיזיקליות. למרות זאת, החוק מיוחס לניוטון כי הוא הראשון שניסח אותו כחלק מאוסף חוקים פיזיקליים המתארים את התנועה ואת הכוחות, וזאת בספרו "העקרונות המתמטיים של פילוסופיית הטבע" שיצא לאור בשנת 1687.

החוק הראשון מתייחס למצב שבו הכוח השקול הפועל על גוף מסוים מתאפס. על מנת להבין חוק זה נתחיל בהגדרת הכוח השקול.

1. הכוח השקול

הגדרה:

הכוח השקול של מספר כוחות הפועלים על גוף מסוים, מוגדר ככוח היחיד אשר אם מחליפים בו את הכוחות הנתונים, תהיה לו אותה השפעה על הגוף כמו ההשפעה של הכוחות שפעלו עליו.

נלמד בהמשך שהשפעת כוח שקול על הגוף מתבטאת בכך שהגוף נע בתאוצה. לכן ניתן להגדיר את הכוח השקול גם באופן הבא:

הכוח השקול של מספר כוחות הפועלים על גוף מסוים, מוגדר ככוח היחיד אשר אם מחליפים בו את הכוחות הנתונים יגרום לגוף לנוע באותה תאוצה שהייתה לו בהשפעת הכוחות שפעלו עליו מקודם.

אם נתונים מספר כוחות הפועלים על גוף מסוים, $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, ..., הכוח השקול של כוחות אלה, המסומן ב-$\Sigma\vec{F}$, הוא הסכום הוקטורי שלהם, כלומר:

$$\Sigma\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \cdots \quad (1)$$

בספר זה נעסוק רק במקרים שבהם הכוחות הפועלים על גוף מסוים נמצאים כולם באותו מישור. על מנת למצוא את השקול של הכוחות הנתונים (הסכום הוקטורי שלהם) במקרה זה, מתקדמים על פי השלבים הבאים:

1. בוחרים מערכת צירים xy מתאימה.
2. משרטטים במערכת זו את הכוחות הנתונים (גודל וכיוון) כך שכולם יוצאים מראשית מערכת הצירים.
3. במערכת שבחרנו, מפרקים את הכוחות לרכיבים הניצבים שלהם.
4. מוצאים את שקול הרכיבים ΣF_x בכיוון ציר x ו-ΣF_y בכיוון ציר y:

$$\Sigma F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + \cdots \quad (2)$$

$$\Sigma F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + \cdots \quad (3)$$

5. מחשבים את גודלו וכיוונו של הכוח השקול על פי הקשרים:

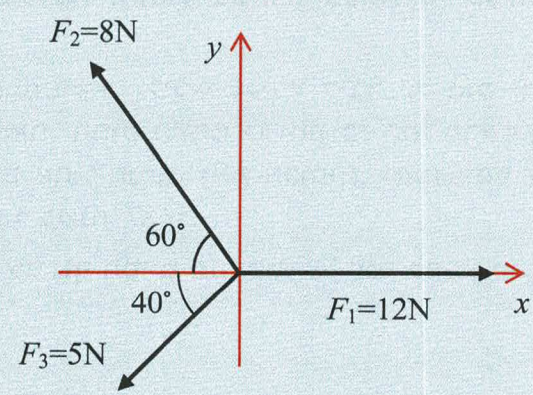
$$\Sigma F = \sqrt{\left(\Sigma F_x\right)^2 + \left(\Sigma F_y\right)^2} \quad (4)$$

$$\tan\alpha = \frac{\Sigma F_y}{\Sigma F_x} \quad (5)$$

דוגמאות:

דוגמה 1

מצא את הכוח השקול של הכוחות המתוארים במערכת הצירים שלפניך.



פתרון:

1. נפרק כל אחד משלושת הכוחות לרכיביו הניצבים:

$$\begin{cases} F_{1x} = 12\,\text{N} \\ F_{1y} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_{2x} = 8\cos 120 = -4\,\text{N} \\ F_{2y} = 8\sin 120 = 6.93\,\text{N} \end{cases}$$

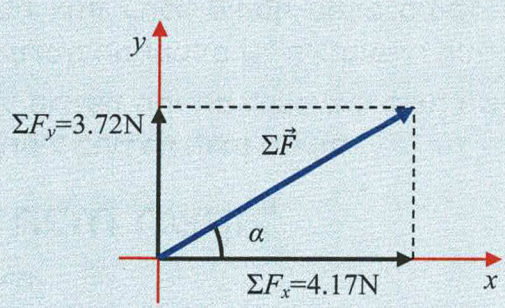
$$\begin{cases} F_{3x} = 5\cos 220 = -3.83\,\text{N} \\ F_{3y} = 5\sin 220 = -3.21\,\text{N} \end{cases}$$

2. נחשב את סכום הרכיבים בכיוון ציר x, ואת סכום הרכיבים בכיוון ציר y:

$$\Sigma F_x = 12 + (-4) + (-3.83) = 4.17\,\text{N}$$

$$\Sigma F_y = 0 + 6.93 + (-3.21) = 3.72\,\text{N}$$

3. נחשב את גודל וכיוון הכוח השקול. בתרשים הבא מתוארים ΣF_x ו-ΣF_y:



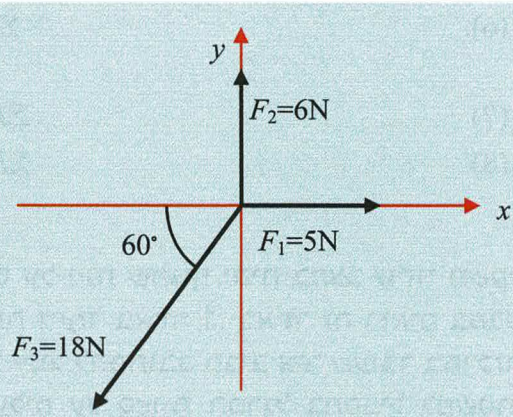
בעזרת תרשים זה נקבל:

$$\Sigma F = \sqrt{(4.17)^2 + (3.72)^2} = 5.59\,\text{N}$$

$$\tan\alpha = \frac{\Sigma F_y}{\Sigma F_x} = \frac{3.72}{4.17} \Rightarrow \alpha = 41.73^\circ$$

דוגמה 2

בתרשים שלפניך מתוארים הכוחות הפועלים על גוף מסוים:



א. חשב את הכוח השקול של כוחות אלה.

ב. מצא את גודלו וכיוונו של הכוח הרביעי שיש להפעיל על הגוף על מנת שהכוח השקול יתאפס.

פתרון:

א. נבצע כאן את החישוב בדרך מקוצרת. קודם כל נחשב את הזוויות של הוקטורים ביחס לכיוון החיובי של ציר x. נקבל:

$$\alpha_1 = 0$$

$$\alpha_2 = 90^\circ$$

$$\alpha_3 = 180^\circ + 60^\circ = 240^\circ$$

מכאן נקבל:

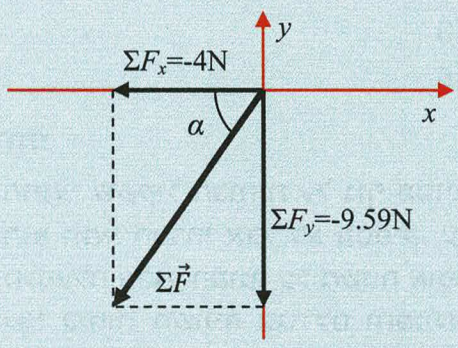
$$\Sigma F_x = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} =$$

$$= 5\cos 0 + 6\cos 90 + 18\cos 240 = -4\,\text{N}$$

$$\Sigma F_y = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} =$$

$$= 5\sin 0 + 6\sin 90 + 18\sin 240 = -9.59\,\text{N}$$

בתרשים הבא מתוארים רכיבי הוקטור השקול:



לכן גודל הכוח השקול הוא:

$$\Sigma F = \sqrt{(-4)^2 + (-9.59)^2} = 10.4\,\text{N}$$

וכיוונו הוא:

$$\tan\alpha = \frac{\Sigma F_y}{\Sigma F_x} = \frac{-9.59}{-4} = 2.398$$

$$\Rightarrow \alpha = 67.36^\circ$$

מכיוון שהכוח השקול נמצא ברביע השלישי (כי שני הרכיבים שלו שליליים), נקבל שהזווית שלו היא:

$$\alpha = 67.36^\circ + 180^\circ = 247.36^\circ$$

ב. הכוח הרביעי, אותו יש להפעיל על הגוף על מנת שהכוח השקול יתאפס שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח השקול (של שלושת הכוחות הראשונים). לכן, גודלו של כוח זה $10.4\,\text{N}$ וכיוונו הוא 67.36° ביחס לציר x.

2. החוק הראשון של ניוטון

החוק הראשון של ניוטון מתייחס למצב שבו לא פועלים על גוף מסוים כוחות, או פועלים עליו מספר כוחות שהשקול שלהם מתאפס. להלן ניסוח חוק זה:

אם לא פועלים על גוף מסוים כוחות, או פועלים עליו מספר כוחות שהשקול שלהם מתאפס, הגוף יהיה במנוחה או ינוע במהירות קבועה (כלומר ינוע בקו ישר במהירות שגודלה קבוע).

על פי חוק זה אם שקול הכוחות הפועלים על גוף מסוים מתאפס, הגוף מתמיד במצב שבו הוא נמצא. אם הוא נמצא במנוחה יישאר במנוחה, ואם הוא נע במהירות, הוא ימשיך לנוע באותה מהירות (גודל וכיוון). לכן חוק זה נקרא גם **חוק ההתמדה**.

גוף שמהירותו שווה לאפס או נע במהירות קבועה (גודל וכיוון), הוא גוף שתאוצתו שווה לאפס. לכן ניתן לנסח את החוק הראשון של ניוטון בניסוח נוסף, והוא:

אם הכוח השקול על גוף מסוים מתאפס אז גם תאוצתו מתאפסת.

הגדרה: גוף הנמצא במצב **שיווי משקל** הוא גוף ששקול הכוחות הפועלים עליו מתאפס.

על פי הגדרה זו ניתן לנסח את החוק הראשון של ניוטון גם כך:

אם הגוף נמצא במצב שיווי משקל אז תאוצתו מתאפסת. כמובן, גם ההפך נכון, כלומר אם תאוצת הגוף מתאפסת אז הוא נמצא במצב שיווי משקל (שקול הכוחות הפועלים עליו מתאפס).

הניסוח האחרון מאפשר לבטא את החוק הראשון של ניוטון בשפת המתמטיקה, כך שנקבל:

$$\Sigma\vec{F}=0 \Leftrightarrow \vec{a}=0 \qquad (6)$$

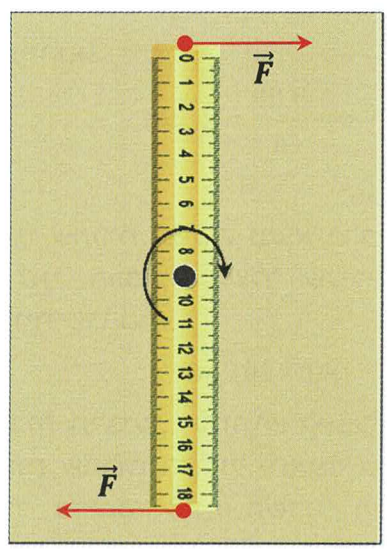
או ברכיבים:

$$\Sigma F_x=0 \Leftrightarrow a_x=0 \qquad (7)$$

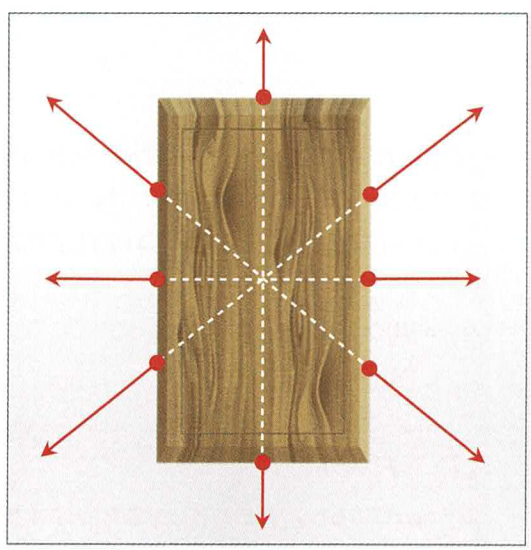
$$\Sigma F_y=0 \Leftrightarrow a_y=0 \qquad (8)$$

הערות:

1. התנאי ששקול הכוחות על גוף מסוים צריך להתאפס על מנת שהגוף יהיה במצב שיווי משקל הוא תנאי הכרחי אבל לא מספיק. על מנת להבין זאת ניעזר באיור 1. באיור זה רואים במבט מלמעלה סרגל המונח על משטח אופקי וחלק. הסרגל יכול להסתובב סביב ציר שעובר במרכזו. שני כוחות השווים בגודלם והמנוגדים בכיוונם פועלים על קצוות הסרגל במקביל למשטח. במצב זה, למרות שסכום הכוחות מתאפס, הסרגל לא יהיה במצב שיווי משקל, אלא יסתובב סביב צירו בתאוצה זוויתית עד שהוא מתיישר.



איור 1: סרגל המונח על משטח אופקי חלק, ויכול להסתובב סביב ציר סיבוב שעובר במרכזו.



איור 2: שקול הכוחות מתאפס, ובנוסך הכוחות נחתכים בנקודה אחת בגוף כך שהוא לא יוכל להסתובב.

2. על מנת לא לעסוק במצבים שבהם $\Sigma\vec{F}=0$ והגוף עדיין יכול להסתובב בתאוצה, נדון רק במקרים שבהם מתקיימים התנאים הבאים:

א. ממדי הגוף קטנים מאוד (הגוף נקודתי) כך שהכוחות כולם מתלכדים בנקודה אחת והגוף אינו יכול להסתובב.

ב. אם ממדי הגוף אינם זניחים, אז המקרים בהם נעסוק הם המקרים שבהם וקטורי הכוחות הפועלים על הגוף נחתכים בנקודה אחת בגוף, כפי שמתואר באיור 2, כך שהגוף אינו יכול להסתובב. במקרה זה ניתן להחליף את הגוף בגוף נקודתי, בעל מסה זהה, הנמצא בנקודה שבה הכוחות מתלכדים, וכך הפיזיקה של התנועה לא תשתנה.

3. במקרים המתוארים בסעיפים א' ו-ב', המכניקה נקראת **מכניקה של גופים נקודתיים**. במסגרת ספר זה נדון במקרים מסוג זה בלבד.

4. למרות שאנחנו עוסקים רק במכניקה של גופים נקודתיים, אנחנו משרטטים בדרך כלל גופים בעלי ממדים וזאת לשם המחשה. במקרים כאלו צריך לדאוג לכך שבתרשים הכוחות, כל הכוחות פועלים בנקודה אחת בגוף (בדרך כלל מרכז הגוף).

נסיים סעיף זה בכך שנציין שהחוק המוכר כיום בשם "החוק הראשון של ניוטון" היה ידוע עוד בתקופה שקדמה לימי ניוטון. גלילאו גליליי כתב על חוק ההתמדה. מעניין לדעת איך הגיע גלילאו

למסקנה שאם הכוח השקול של הכוחות הפועלים על גוף מסוים מתאפס אז הגוף יכול להיות גם במצב של תנועה במהירות קבועה ולא רק במנוחה.

במהלך מסעותיו בים. גלילאו שם לב לכך שכאשר משחררים חפץ מעמדת התצפית בקצה העליון של התורן באונייה, החפץ נופל על הסיפון בדיוק מתחת לתורן, וזאת ללא קשר למהירות האונייה (בהנחה, כמובן, שאין רוח).

גלילאו ציפה שבגלל תנועת האונייה החפץ ייפול מאחורי התורן, קרוב יותר לקצה האחורי של האונייה. מכיוון שזה לא קרה הוא הגיע למסקנה שבכיוון התנועה, החפץ קיבל את מהירות האונייה ושבמהלך הנפילה הוא התמיד לנוע גם בכיוון זה במהירות האונייה, ונפל בדיוק מתחת לנקודה ממנה שוחרר. מכיוון שבכיוון זה לא פועלים כוחות על החפץ, גלילאו הסיק את חוק ההתמדה: אם לא פועלים על גוף כוחות בכיוון מסוים, הגוף ימשיך לנוע בכיוון זה במהירות קבועה (כמובן אם יש לגוף מהירות התחלתית בכיוון זה).

3. בעיות בחוק הראשון של ניוטון

בעיה 1

מניחים גוף שמסתו 4kg על משטח אופקי.

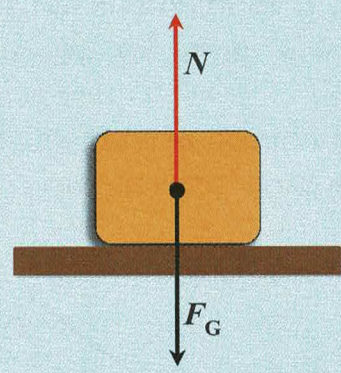
א. צייר תרשים ורשום בו חיצים המייצגים את הכוחות הפועלים על הגוף. ציין מי מפעיל כוחות אלה.

ב. חשב את הכוחות שציינת בסעיף הקודם.

ג. חשב את הכוח שהגוף מפעיל על המשטח.

פתרון:

א. הכוחות הפועלים על הגוף הם: כוח הכובד F_G שכיוונו אנכי כלפי מטה, והכוח הנורמלי N שכיוונו אנכי כלפי מעלה. כוחות אלה מתוארים בתרשים הבא:



כדור הארץ הוא זה שמפעיל את הכוח F_G והמשטח הוא שמפעיל את הכוח הנורמלי N.

ב. כוח הכובד נתון על ידי:

$$F_G=(10\text{N/kg})m=$$
$$=(10\text{N/kg})(4\text{kg})=40\text{N}$$

על מנת לחשב את הכוח הנורמלי N, ניעזר בחוק הראשון של ניוטון. לשם כך נבחר את הכיוון החיובי של ציר y כלפי מעלה. מכיוון שהגוף נמצא במצב שיווי משקל, נקבל על פי החוק הראשון של ניוטון ש:

$$\Sigma F_y=0 \Rightarrow N+F_G=0$$

על פי הציר שבחרנו מתקיים ש: $F_G=-40\text{N}$. נציב F_G בקשר הנ"ל ונקבל:

$$N+(-40)=0 \Rightarrow N=40\text{N}$$

ג. הגוף מפעיל על המשטח כוח נורמלי N' השווה בגודלו לכוח N אבל מנוגד לו בכיוון, כלומר כוח של 40N בכיוון ניצב כלפי מטה. בהתייחס לציר שבחרנו נקבל: $N'=-40\text{N}$.

בעיה 2

מפעילים על הגוף שבבעיה הקודמת כוח $F=20\text{N}$ בכיוון מטה.

א. חשב את הכוח הנורמלי הפועל על הגוף.

ב. חשב את הכוח שהגוף מפעיל על המשטח.

ג. מניחים את הגוף במצב המתואר בבעיה זו על מאזניים למדידת כוח. חשב מה תהיה קריאת המאזניים (משקל הגוף).

פתרון:

א. נבחר את הכיוון החיובי של ציר y כלפי מעלה. מכיוון שהגוף נמצא במנוחה, נקבל על פי החוק הראשון של ניוטון ש:

$$\Sigma F_y=0 \Rightarrow N+F+F_G=0$$

על פי הציר שבחרנו מתקיים: $F_G=-40\text{N}$ ו- $F=-20\text{N}$. נציב במשוואה הנ"ל ונקבל:

$$N+(-20)+(-40)=0 \Rightarrow N=60\text{N}$$

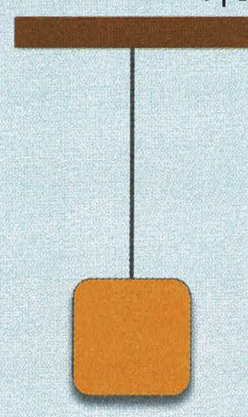
כלומר המשטח מפעיל על הגוף כוח של $60\,\text{N}$ בכיוון מעלה.

ב. על פי החוק השלישי של ניוטון, הגוף מפעיל על המשטח כוח N' השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח N, כלומר כוח של $60\,\text{N}$ בכיוון מטה $(N'=-60\,\text{N})$.

ג. קריאת המאזניים (משקלו של הגוף- W) שווה לגודלו של הכוח שהגוף מפעיל על המאזניים, שהוא הכוח N'. על סמך הסעיף הקודם נקבל: $W=60\,\text{N}$.

בעיה 3

קושרים גוף שמסתו $m=3\,\text{kg}$ לתקרה באמצעות חוט שמסתו זניחה כפי שמתואר בתרשים שלפניך:

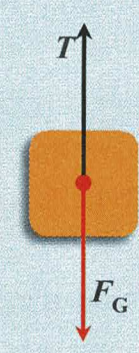


א. כתוב מהם הכוחות הפועלים על הגוף, וציין מי מפעיל כוחות אלה.

ב. חשב את הכוחות שציינת בסעיף הקודם.

פתרון:

א. הכוחות הפועלים על הגוף הם כוח הכובד F_G וכיוונו כלפי מטה, והמתיחות בחוט, T, כלפי מעלה. כוחות אלה מתוארים בתרשים הבא:



כדור הארץ מפעיל את הכוח F_G והחוט מפעיל את הכוח T.

ב. מכיוון שהגוף נמצא במצב שיווי משקל, נקבל על פי החוק הראשון של ניוטון ששקול הכוחות הפועלים על הגוף מתאפס. נבחר את הכיוון החיובי של ציר y בכיוון מעלה ונקבל:

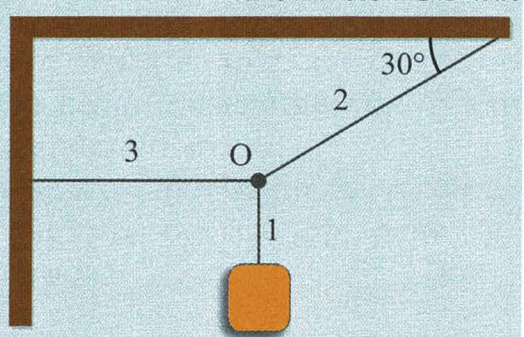
$$T+F_G=0$$

כאשר על פי הציר שבחרנו מתקיים: $F_G=-30\,\text{N}$. נציב במשוואה הנ"ל ונקבל:

$$T+(-30)=0 \;\Rightarrow T=30\,\text{N}$$

בעיה 4

מסת הגוף הנתון בתרשים שלפניך היא $2\,\text{kg}$ ומסת החוטים זניחה. חשב את המתיחות בכל אחד משלושת החוטים.

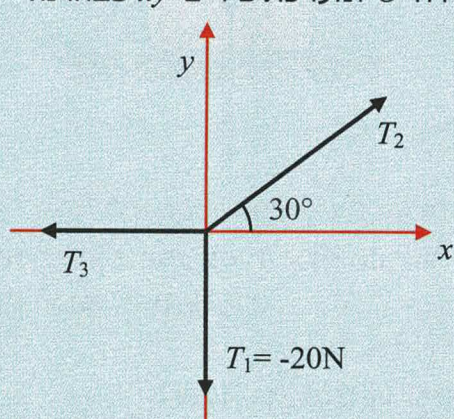


פתרון:

בדומה לפתרון בבעיה הקודמת נקבל ש- $T_1=F_G=20\,\text{N}$.

על מנת לחשב את המתיחויות T_2 ו- T_3 ניעזר בחוק הראשון של ניוטון עבור הכוחות שפועלים בנקודה O.

בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הנקודה O ומערכת צירים xy שבחרנו.



מכיוון שהמערכת נמצאת במצב שיווי משקל, נקבל ש- $\Sigma\vec{T}=0$ בנקודה O. מתנאי זה נקבל:

$\Sigma T_y = 0$

$\Sigma T_x = 0$

מהתנאי הראשון נקבל:

$T_2 \sin 30 + T_{1y} = 0$

$\Rightarrow T_2 \sin 30 + (-20) = 0 \quad \Rightarrow T_2 = 40\,\text{N}$

מהתנאי השני נקבל:

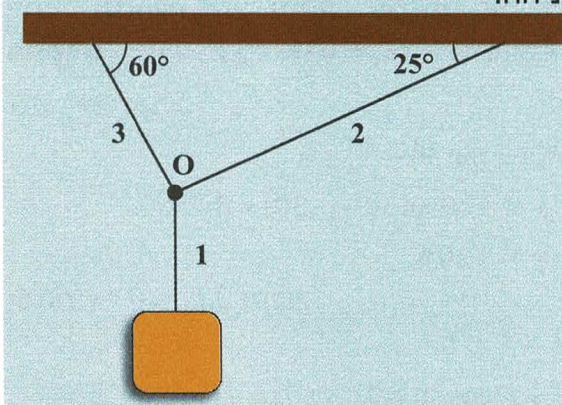
$T_2 \cos 30 + T_3 = 0$

$\Rightarrow 40 \cos 30 + T_3 = 0$

$\Rightarrow T_3 = -34.6\,\text{N}$

בעיה 5

במערכת המתוארת בתרשים שלפניך נתון שמסת הגוף היא 3kg ושמסת החוטים זניחה.



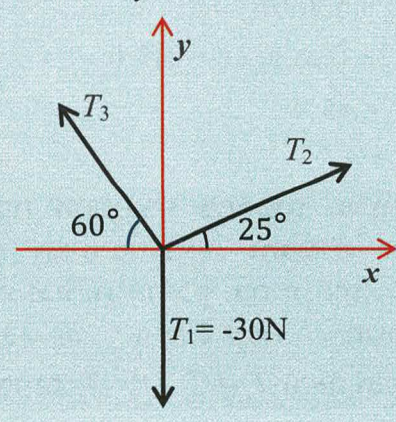
חשב את המתיחויות בשלושת החוטים.

פתרון:

על פי החוק הראשון של ניוטון עבור הגוף נקבל שמתקיים ש-$T_1 = F_G = 30\,\text{N}$.

על מנת לחשב את המתיחויות T_2 ו-T_3 ניעזר בחוק הראשון של ניוטון עבור הכוחות הפועלים בנקודה O.

בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים בנקודה O ומערכת צירים xy שבחרנו.



על פי החוק הראשון של ניוטון מתקיים: $\Sigma T_x = 0$ ו- $\Sigma T_y = 0$. מהתנאי הראשון נקבל:

$T_2 \cos 25 = T_3 \cos 60$

מהתנאי השני נקבל:

$T_2 \sin 25 + T_3 \sin 60 = 30$

מהמשוואה הראשונה נקבל:

$$(9)\quad T_2 = \frac{\cos 60}{\cos 25} T_3$$

נציב במשוואה השנייה ונקבל:

$$T_3 \left(\frac{\cos 60}{\cos 25} \sin 25 + \sin 60 \right) = 30$$

$\Rightarrow T_3 = 27.3\,\text{N}$

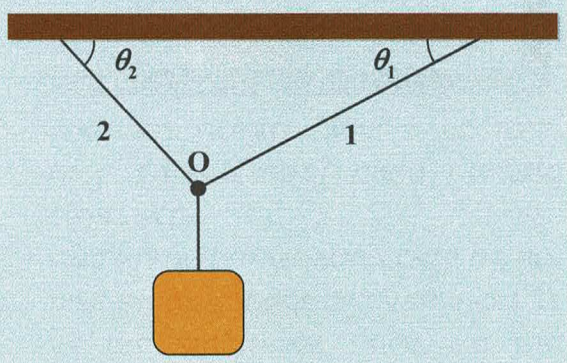
נציב T_3 במשוואה (9) ונקבל:

$$T_2 = \frac{\cos 60}{\cos 25}(27.3) = 15\,\text{N}$$

שים לב שמתקיים ש-$T_2 < T_3$. במערכת זו תמיד החבל היוצר עם התקרה זווית גדולה יותר המתיחות בו גדולה יותר. נוכיח תכונה זאת בבעיה הבאה.

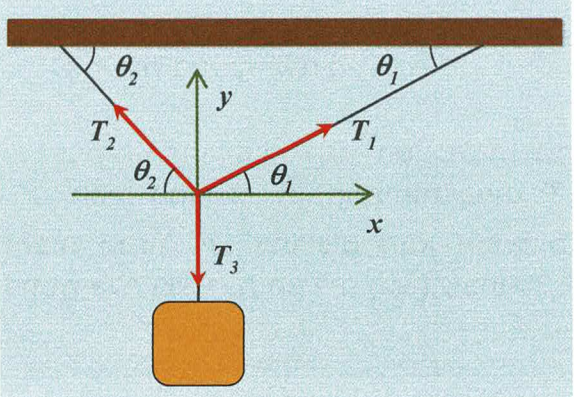
בעיה 6

בתרשים שלפניך נתון ש-$\theta_2 > \theta_1$. הוכיח ש-$T_2 > T_1$.



הוכחה:

בתרשים הבא מוצגים הכוחות הפועלים בנקודה O:



בכיוון אופקי מתקיים על פי החוק הראשון

של ניוטון:

$$\Sigma T_x = 0$$

$$\Rightarrow T_2 \cos\theta_2 = T_1 \cos\theta_1$$

$$\Rightarrow T_2 = T_1 \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} \quad (10)$$

מכיוון ששתי הזויות θ_1 ו-θ_2 הן בין 0 ל-90°. ומכיוון שבתחום זה פונקציית הקוסינוס יורדת, נקבל שאם $\theta_2 > \theta_1$ אז $\cos\theta_2 < \cos\theta_1$ מכאן:

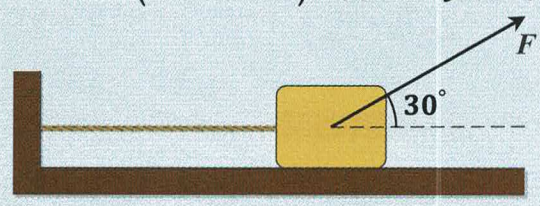
$$\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} > 1$$

מהקשר האחרון וממשוואה (10) נקבל ש-$T_2 > T_1$.

בעיה 7

נתון גוף שמסתו $m = 3\text{kg}$ נמצא על משטח אופקי וחלק. הגוף קשור לקיר באמצעות חוט הנמצא במצב אופקי.

מפעילים על הגוף כוח של 20N היוצר זווית בת 30° עם המשטח (ראה תרשים).



א. רשום את הכוחות הפועלים על הגוף. הוסף לתרשים הנתון חיצים המייצגים כוחות אלה.

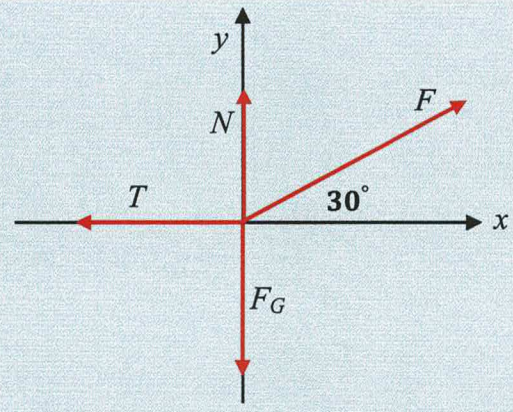
ב. חשב את הכוחות שרשמת בסעיף הקודם.

ג. חשב את הערך המקסימלי עבור הכוח F על מנת שהחוט לא ייקרע, אם נתון שהמתיחות המקסימלית שהחוט יכול לשאת היא 20N.

ד. חשב את הכוח הנורמלי הפועל על הגוף כאשר מפעילים את הכוח המקסימלי שחישבת בסעיף הקודם.

פתרון:

א. הכוחות הפועלים על הגוף הם: כוח הכובד F_G, הכוח הנורמלי N, המתיחות בחוט T והכוח הנתון F. בתרשים הבא מתוארים כוחות אלה במערכת הצירים (xy) שבחרנו:



ב. נתון $F = 20\text{N}$, כוח הכובד: $F_G = -10m = -30\text{N}$.

על מנת לחשב את הכוחות N ו-T ניעזר בחוק הראשון של ניוטון. על פי חוק זה מתקיים $\Sigma F_y = 0$ ו-$\Sigma F_x = 0$. מהתנאי $\Sigma F_y = 0$ נקבל:

$$N + F\sin 30 + F_G = 0$$

$$\Rightarrow N + 20\sin 30 + (-30) = 0$$

$$\Rightarrow N = 20\text{N}$$

ומהתנאי $\Sigma F_x = 0$ נקבל:

$$T + F_x = 0$$

$$T + F\cos 30 = 0 \quad \Rightarrow T = -17.3\text{N}$$

ג. $F_{\max}$ מתקבל עבור $T = T_{\max} = 20\text{N}$. מהתנאי $\Sigma F_x = 0$ נקבל:

$$F_{\max}\cos 30 + (-T_{\max}) = 0$$

$$\Rightarrow F_{\max} = \frac{T_{\max}}{\cos 30} = \frac{20}{\cos 30} = 23.1\text{N}$$

ד. על מנת לחשב את הכוח הנורמלי N כאשר $F = F_{\max}$, ניעזר בקשר $\Sigma F_y = 0$, ממנו נקבל:

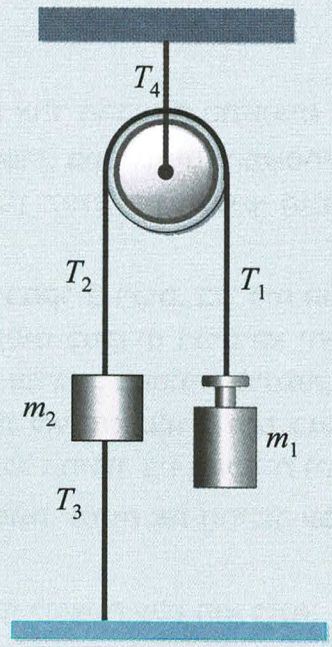
$$N + F_{\max}\sin 30 + F_G = 0$$

$$\Rightarrow N + 23.1\cos 30 + (-30) = 0$$

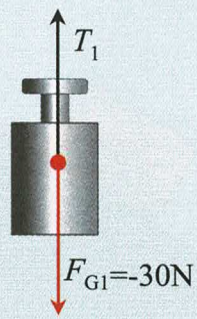
$$\Rightarrow N = 18.45\text{N}$$

בעיה 8

במערכת המתוארת בתרשים שלפניך נתון שמסת החוטים זניחה והגלגלת אידאלית (מסתה וכוחות החיכוך בה זניחים). נתון גם ש-$m_1 = 3\text{kg}$ ו-$m_2 = 2\text{kg}$. חשב את המתיחויות T_1, T_2, T_3 ו-T_4 (ראה תרשים).



פתרון: בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על המסה m_1 כשהכיוון החיובי נבחר כלפי מעלה.



על פי החוק הראשון של ניוטון נקבל:

$$T_1 + F_{G1} = 0$$
$$\Rightarrow T_1 + (-30) = 0$$
$$\Rightarrow T_1 = 30\,\text{N}$$

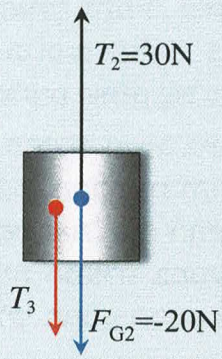
מכיוון שהחוטים המסומנים ב-1 וב-2 הם למעשה אותו החוט, ומאחר ונתון שמסת החוטים זניחה, נקבל:

$$T_2 = T_1 = 30\,\text{N}$$

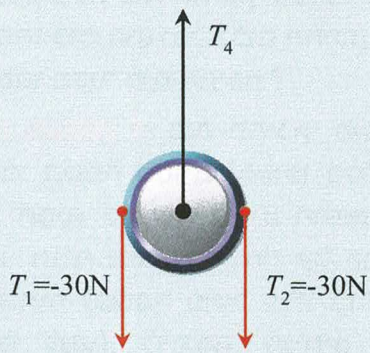
על מנת לחשב את המתיחות T_3 נרשום את הכוחות הפועלים על המסה m_2, שהם $T_2 = 30\,\text{N}$, $F_{G2} = 20\,\text{N}$ ו-T_3. בתרשים הבא מתוארים כוחות אלה כשהכיוון החיובי נבחר כלפי מעלה.

על פי החוק הראשון של ניוטון נקבל עבור גוף זה:

$$T_2 + T_3 + F_{G2} = 0$$
$$\Rightarrow 30 + T_3 + (-20) = 0$$
$$\Rightarrow T_3 = -10\,\text{N}$$



על מנת לחשב את המתיחות T_4, נרשום את הכוחות הפועלים על הגלגלת, והם הכוחות המתוארים בתרשים הבא (כאשר בחרנו את הכיוון החיובי כלפי מעלה).



מכיוון שהגלגלת אידיאלית, מסתה שווה לאפס. לכן כוח הכובד עליה מתאפס.

על פי החוק הראשון של ניוטון נקבל עבור הגלגלת:

$$T_4 + 2T_1 = 0$$
$$\Rightarrow T_4 + 2(-30) = 0$$
$$\Rightarrow T_4 = 60\,\text{N}$$

4. כוח החיכוך

כוח החיכוך, המסומן באות f מהמילה הלועזית friction, הוא אחד מהכוחות החשובים והנפוצים שנתקלים בו באופן מתמיד. כוח החיכוך מופיע בכל הקשר אפשרי; בין הגופים והמשטחים עליהם הם נעים, בין הגופים לאוויר, בין הגופים הנעים בתוך נוזל לבין הנוזל, בין חלקיקי הנוזל הנמצא בתנועה, בין חלקים שונים של מכונות הנמצאים בתנועה ועוד...

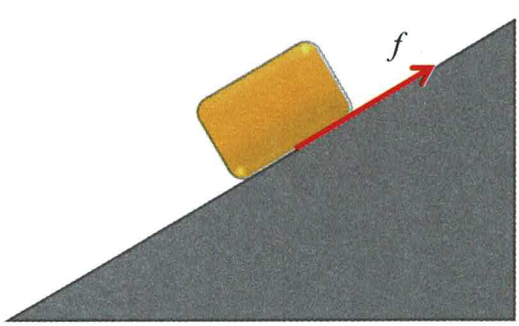
מצד אחד כוח החיכוך חשוב ביותר, אבל מצד שני הוא לא רצוי במקרים רבים. בלי כוח החיכוך אנו לא יכולים ללכת, המכוניות והרכבים לא יכולים לנסוע, וגם גופים במקרים רבים לא יהיו יציבים במקומם. לעומת זאת, כוח החיכוך הוא הגורם העיקרי לבזבוז אנרגיה. במכונית לדוגמה, יותר מ-80% מהאנרגיה הנוצרת במנוע בתהליך שריפת הדלק הולכת לאיבוד בצורת חום בגלל כוחות החיכוך בין חלקי המנוע הנעים והמתחככים האחד בשני וגם בגלל החיכוך בין המכונית והאוויר.

בספר זה אנו נדון רק בחיכוך בין גוף לבין המשטח עליו הוא מונח, ונזניח את החיכוך עם האוויר. בנוסף, לא נדון בבעיות של חיכוך בנוזלים.

בהמשך נשיב על השאלות הבאות, הנוגעות לכוח החיכוך בין גוף למשטח עליו הוא מונח:

1. באילו מקרים מופיע כוח החיכוך?
2. מהו כיוון כוח החיכוך הפועל על גוף מסוים, במקרים בהם מופיע כוח זה?
3. מהו כוח התגובה לכוח החיכוך הפועל על הגוף?
4. מהו מקור כוח החיכוך?

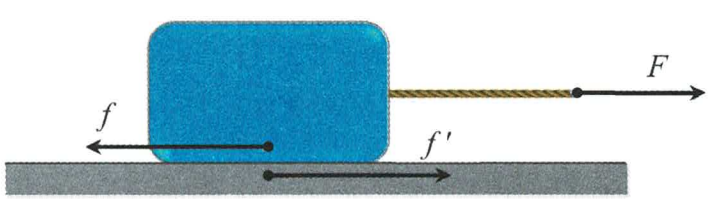
התשובה לשאלה 1: כוח החיכוך מופיע כאשר הגוף נע על גבי משטח מסוים (באופן כללי, כאשר קיימת מהירות יחסית בין שני גופים הנמצאים במגע פיזי), או כאשר הגוף נמצא במנוחה על המשטח אבל הוא נוטה לתנועה (כלומר פועל עליו כוח חיצוני המנסה לגרום לו לנוע). לדוגמה, מניחים גוף על מישור משופע, כפי שמתואר באיור 3, והוא נשאר במנוחה. במקרה זה יש לגוף נטייה לנוע במורד המישור המשופע, אבל הוא נשאר במנוחה בגלל כוח החיכוך המופעל עליו על ידי המישור המשופע (ראה איור 3).



איור 3: גוף נמצא במנוחה על מישור משופע בהשפעת כוח החיכוך.

התשובה לשאלה 2: כיוון כוח החיכוך הפועל על גוף המונח על משטח הוא תמיד מקביל למשטח, וכיוונו מנוגד תמיד לכיוון תנועת הגוף, או לכיוון אליו הגוף נוטה לנוע (ראה איור 3).

התשובה לשאלה 3: כוח החיכוך, כמו כל כוח אחר, מקיים את החוק השלישי של ניוטון. כוח החיכוך נובע מאינטראקציה בין הגוף ובין המשטח עליו הוא מונח. אינטראקציה זו נוצרת כאשר הגוף נמצא בתנועה או נוטה לנוע. כתוצאה מאינטראקציה זו, המשטח מפעיל על הגוף כוח חיכוך (התנגדות) f בכיוון מקביל למשטח נגד כיוון תנועתו או נגד כיוון הנטייה שלו לתנועה כפי שמתואר באיור 4, והגוף מפעיל על המשטח כוח חיכוך f' בכיוון תנועת הגוף או בכיוון נטייתו לתנועה (ראה איור 4). לכן כוח התגובה לכוח החיכוך f שהמשטח מפעיל על הגוף, הוא כוח f' שהגוף מפעיל על



איור 4: כוחות החיכוך הם כוחות אינטראקציה הפועלים בין הגוף והמשטח כאשר הגוף נע על המשטח או נוטה לנוע עליו.

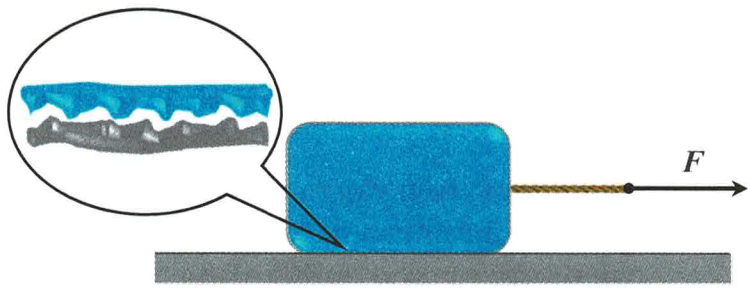
המשטח בכיוון תנועת הגוף או בכיוון הנטייה שלו לתנועה. כאשר מנתחים את תנועת הגוף אנו מתמקדים בכוחות הפועלים על הגוף בלבד, ולכן אנו מתייחסים לכוח החיכוך f בלבד ולא ל-f', כי הכוח f' אינו פועל על הגוף אלא על המשטח.

התשובה לשאלה 4: מקור כוח החיכוך הוא האינטראקציה בין החלק התחתון של הגוף ובין המשטח עליו הגוף מונח. אינטראקציה זו נובעת משתי סיבות עיקריות:

א. כוחות אלקטרומגנטיים (כוחות בין המטענים החשמליים באזור המגע בין הגוף והמשטח). כוחות אלה גורמים להופעת כוחות החיכוך הפועלים על הגוף והמשטח כאשר קיימת תנועה יחסית ביניהם או נטייה לתנועה.

ב. כוחות מכניים הנובעים מאחיזה בין הבליטות המיקרוסקופיות המצויות הן על הגוף והן על המשטח באזור המגע ביניהם, כפי שמתואר באיור 5. אחיזה זו מייצרת כוחות מכניים המעכבים את התנועה. ככל שהמשטח יותר מחוספס, כוח החיכוך גדל, וכך גם להפך.

הכוחות האלקטרומגנטיים, לצד הכוחות הנובעים מהאחיזה המכנית בין הבליטות שעל הגוף והמשטח באזור המגע ביניהם, מסתכמים ביחד לכוח שקול שהוא כוח החיכוך.



איור 5: האחיזה בין הבליטות באזור המגע בין הגוף למשטח גורמת להופעת כוחות חיכוך נגד כיוון התנועה.

מבדילים בין שני סוגי חיכוך. הראשון הנקרא **חיכוך סטטי** והוא החיכוך הפועל בין גוף ובין המשטח עליו מונח הגוף, כשהגוף נמצא במנוחה, אבל נוטה לנוע.

הסוג השני הנקרא **חיכוך קינטי** או **דינמי**, והוא החיכוך הפועל בין גוף ובין המשטח עליו מונח הגוף, כשהגוף נמצא בתנועה על המשטח.

האבחנה בין שני סוגי החיכוך נובעת מכך שלשני סוגי החיכוך יש תכונות שונות, וגם דרך החישוב שלהם שונה, כפי שנלמד בהמשך.

4.1. כוח החיכוך הסטטי

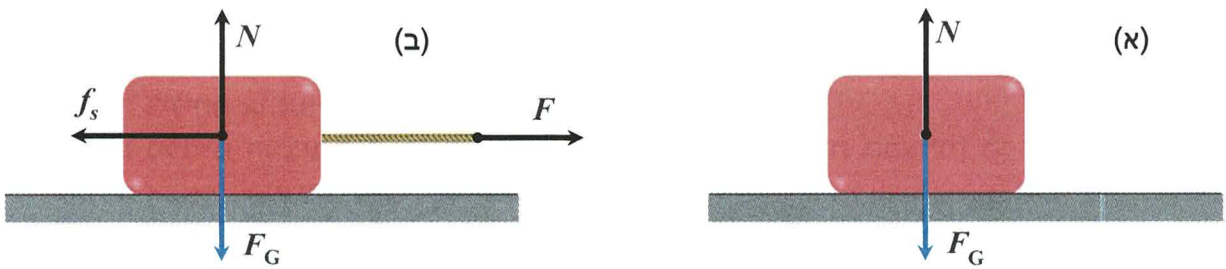
כוח החיכוך הסטטי הוא כוח החיכוך הפועל בין גוף ובין המשטח עליו מונח הגוף, כשהגוף נמצא במנוחה, אבל יש לו נטייה לנוע, כלומר פועל עליו כוח חיצוני המנסה לגרום לו לנוע. כוח החיכוך הסטטי מסומן ב-f_s מהלועזית Static friction.

על מנת לעמוד על תכונות החיכוך הסטטי, נניח שגוף (בצורת תיבה לדוגמה) מונח על משטח אופקי לא חלק כפי שמתואר באיור 6א. במצב זה, פועלים על הגוף שני כוחות בלבד, והם כוח הכובד F_G והכוח הנורמלי N (ראה איור 6א).

אם מפעילים על הגוף כוח אופקי F שגודלו, לדוגמה, 1N והגוף נשאר במנוחה, נסיק מכך, על פי החוק הראשון של ניוטון, שפעל על הגוף כוח השווה בגודלו והמנוגד בכיווני לכוח F. זהו כוח החיכוך הסטטי f_s שכיוונו מנוגד לכיוון הכוח F וגודלו 1N (ראה איור 6ב).

אם נגדיל את הכוח F ל-2N והגוף יישאר במנוחה, נסיק שכוח החיכוך הסטטי גדל ל-2N $\left(f_s = 2\text{N}\right)$. מכאן רואים שכוח החיכוך הסטטי גדל ככל שהכוח F גדל, וכל עוד הגוף נמצא

במנוחה מתקיים $f_s = F$. עם זאת, ברור שאם f_s היה גדל ללא גבול, לא היינו מצליחים לעולם לגרום לגוף לנוע. אבל מתברר שהחיכוך הסטטי f_s גדל עד ערך מקסימלי מסוים המסומן $f_{s\max}$ שמעבר לו החיכוך הסטטי אינו יכול לגדול. לכן אם הכוח F מקיים התנאי $F \le f_{s\max}$, הגוף נשאר במנוחה ויפעל עליו כוח חיכוך סטטי f_s המקיים $f_s = F$. אם הכוח F מקיים התנאי $F > f_{s\max}$, הגוף יתחיל לנוע.



איור 6: (א) גוף מונח על משטח אופקי. (ב) כוח החיכוך הסטטי מופיע כאשר פועל על הגוף כוח המנסה להניע את הגוף, אבל הגוף עדיין נמצא במנוחה.

איך ניתן לקבוע את ערכו של החיכוך הסטטי המקסימלי, $f_{s\max}$?

הפיזיקאים גילו על סמך הניסויים שגודלו של החיכוך הסטטי המקסימלי $(f_{s\max})$ תלוי בגורמים הבאים:

1. סוגי החומרים מהם עשויים הגוף והמשטח עליו מונח הגוף.
2. בכוחות שהגוף והמשטח מפעילים זה על זה בכיוון ניצב למשטח, שהם הכוחות הנורמליים N ו-N', וזאת בגלל שהאחיזה בין הגוף למשטח מושפעת מכוחות אלה.

על סמך הניסויים התקבל שהערך המקסימלי של החיכוך הסטטי נמצא ביחס ישר לכוח הנורמלי המופעל על הגוף:

$$f_{s\max} = \mu_s N \qquad (11)$$

כאשר μ_s הוא מקדם הפרופורציה בין $f_{s\max}$ ו-N. קבוע זה נקרא **מקדם החיכוך הסטטי**.

מתקיים:

א. μ_s הוא גודל חסר יחידות.

ב. μ_s תלוי בסוגי החומרים מהם עשויים הגוף והמשטח עליו מונח הגוף.

ג. μ_s מתקבל מניסויים. בטבלה הבאה מופיעים ערכי מקדמי החיכוך הסטטי עבור חומרים אחדים:

סוגי החומרים מהם עשויים הגוף והמשטח	מקדם החיכוך הסטטי (μ_s)
ברזל - ברזל	0.74
אלומיניום - ברזל	0.61
נחושת - ברזל	0.53
גומי - בטון	1.00
זכוכית - זכוכית	0.94
קרח - קרח	0.10
אלומיניום - אלומיניום	1.40
גומי - גומי	1.15
פלטינום - פלטינום	1.20

דוגמאות חישוביות בחיכוך סטטי

דוגמה 1

גוף שמסתו $m=6\text{kg}$ נמצא על משטח אופקי לא חלק. נתון שמקדם החיכוך הסטטי בין הגוף והמשטח הוא $\mu_s=0.8$.

א. חשב את גודלו של הכוח האופקי הגדול ביותר, $F_{\max}$, שניתן להפעיל על הגוף כך שהוא יישאר במנוחה.

ב. חשב את כוח החיכוך הסטטי הפועל על הגוף אם מפעילים עליו כוח אופקי F השווה בגודלו למחצית הכוח שחישבת בסעיף הקודם.

ג. מה יהיה מצבו של הגוף אם נפעיל על הגוף כוח אופקי הגדול מהכוח שחישבת בסעיף א'? הסבר.

פתרון:

א. גודלו של הכוח האופקי הגדול ביותר שניתן להפעיל על הגוף כך שהוא יישאר במנוחה שווה לכוח החיכוך הסטטי המקסימלי:

$$F_{\max}=f_{s\max}=\mu_s N$$

על פי החוק הראשון של ניוטון מתקיים בכיוון אכני ש- $N=F_G=60\text{N}$. מכאן נקבל:

$$F_{\max}=\mu_s N=0.8(60)=48\text{N}$$

ב. אם נפעיל על הגוף כוח אופקי השווה ל- 24N, הגוף יישאר במנוחה, כלומר כוח החיכוך הסטטי שיפעל על הגוף יהיה שווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח F. מכאן $f_s=24\text{N}$.

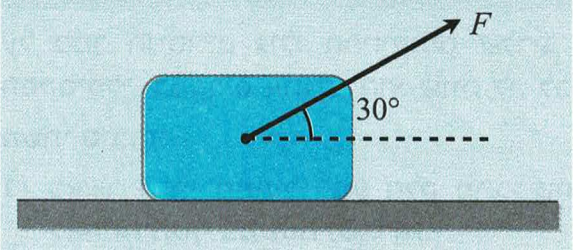
ג. כאשר $F>f_{s\max}$ הגוף יתחיל בתנועה.

דוגמה 2

בתרשים הבא מתואר גוף שמסתו $m=5\text{kg}$ הנמצא במנוחה על משטח אופקי לא חלק. מפעילים על הגוף כוח F היוצר עם המשטח זווית בת 30°. נתון שהכוח גדל בהדרגה, ושמקדם החיכוך הסטטי בין הגוף והמשטח הוא 0.6.

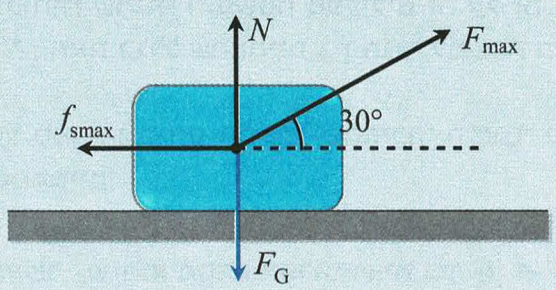
א. חשב את הערך המקסימלי של הכוח F $(F_{\max})$ שעבורו הגוף נשאר במנוחה.

ב. חשב את גודלו של החיכוך הסטטי המופעל על הגוף אם נתון ש- $F=20\text{N}$.



פתרון:

א. $F_{\max}$ מתקבל כאשר לחיכוך הסטטי המופעל על הגוף יש ערך מקסימלי $(f_{s\max})$. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף כאשר לחיכוך הסטטי יש ערך מקסימלי (כלומר כאשר הגוף נמצא על סף תנועה):



נבחר ציר x אופקי וציר y אנכי. בכיוון ציר x מתקיים על פי החוק הראשון של ניוטון:

$$F_{\max}\cos 30=f_{s\max}=\mu_s N \quad (12)$$

בכיוון אנכי מתקיים:

$$N+F_{\max}\sin 30=F_G=50 \quad (13)$$

ממשוואה (13) נקבל:

$$N=50-F_{\max}\sin 30$$

נציב במשוואה (12) ונקבל:

$$F_{\max}\cos 30=\mu_s\left(50-F_{\max}\sin 30\right)$$

$$\Rightarrow F_{\max}=\frac{50\mu_s}{\cos 30+\mu_s\sin 30}=$$

$$=\frac{50(0.6)}{\cos 30+(0.6)\sin 30}=25.73\text{N}$$

ב. הכוח הנתון קטן מ- $F_{\max}$, לכן הגוף נשאר במנוחה ויפעל עליו כוח חיכוך סטטי f_s. על פי החוק הראשון של ניוטון מתקיים בכיוון אופקי:

$$F\cos 30+f_s=0$$

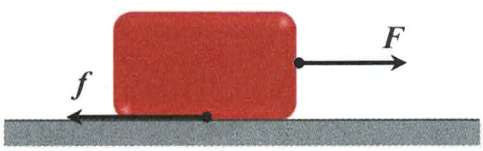
$$\Rightarrow f_s=-F\cos 30=-20\cos 30=-17.32\text{N}$$

4.2. כוח החיכוך הקינטי

כוח החיכוך הקינטי הוא כוח החיכוך הפועל בין הגוף ובין המשטח כאשר הגוף נמצא בתנועה. כוח זה מסומן ב- f_k מהלועזית kinetic friction.

על סמך הניסויים גילו הפיזיקאים שלרוב גודלו של החיכוך הקינטי קטן מהחיכוך הסטטי המקסימלי. במקרים אחדים הוא שווה לו. לכן ניתן לרשום ש- $f_k \le f_{s\max}$. הקשר $f_k < f_{s\max}$ נובע משתי סיבות:

1) כאשר הגוף מתחיל לנוע חלק מהבליטות שגורמות לאחיזת הגוף במשטח נשברות.
2) כאשר הגוף נמצא בתנועה, ברמה המיקרוסקופית הוא "מרחף" על המשטח כך שהאחיזה בין הבליטות מתמעטת.



איור 7: כוח אופקי פועל על גוף מונח אל משטח אופקי לא חלק.

על סמך ניסויים, פיזיקאים גילו שהחיכוך הקינטי תלוי בגורמים הבאים:

א. סוגי החומרים מהם עשויים הגוף והמשטח עליו נע הגוף.

בכוחות שהגוף והמשטח מפעילים זה על זה בכיוון ניצב למשטח, שהם הכוחות הנורמליים N ו- N', וזאת בגלל שהאחיזה בין הגוף למשטח מושפעת מכוחות אלה.

על סמך הניסויים התקבל שהחיכוך הקינטי נמצא ביחס ישר לכוח הנורמלי המופעל על הגוף, כך שמתקיים:

$$f_k = \mu_k N \qquad (14)$$

כאשר μ_k הוא מקדם הפרופורציה בין f_k ו- N. קבוע זה נקרא **מקדם החיכוך הקינטי**.

מתקיים:

א. μ_k הוא גודל חסר יחידות.

ב. μ_k תלוי בסוגי החומרים מהם עשויים הגוף והמשטח עליו מונח הגוף.

ג. מכיוון שמתקיים ש- $f_k \le f_{s\max}$, נקבל ש- $\mu_k \le \mu_s$.

ערכו של μ_k מתקבל באמצעות ניסויים. בטבלה הבאה נמצאים ערכים של מקדמי החיכוך הקינטי עבור חומרים אחדים:

סוגי החומרים	מקדם החיכוך הסטטי (μ_s)	מקדם החיכוך הקינטי (μ_k)
ברזל - ברזל	0.74	0.57
אלומיניום - ברזל	0.61	0.47
נחושת - ברזל	0.53	0.36
גומי - בטון	1.0	0.8
זכוכית - זכוכית	0.94	0.4
קרח - קרח	0.1	0.03
אלומיניום - אלומיניום	1.4	1.2

על פי הקשר (14), מתקבל שכוח החיכוך הקינטי בין הגוף למשטח עבור אותם חומרים הוא גודל קבוע כל עוד N קבוע.

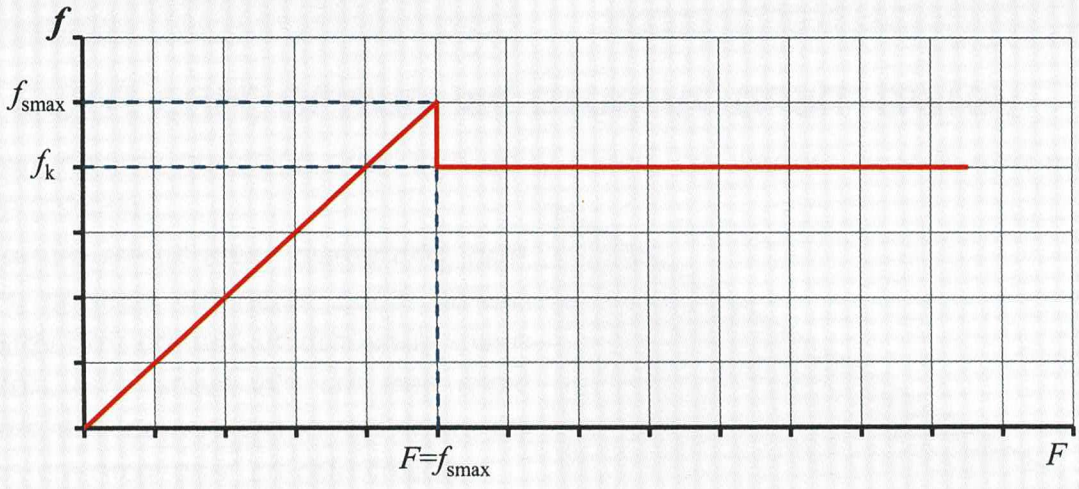
אם נניח גוף על משטח אופקי לא חלק, ונפעיל עליו כוח אופקי F הגדל בהדרגה החל מאפס (באיור 7). כל עוד מתקיים ש- $F \le f_{s\max}$, הגוף יישאר במנוחה, ויפעל עליו כוח חיכוך סטטי f_s

המקיים $f_s = F$.

כאשר הכוח המופעל (F) גדול מ- $f_{s\max}$ $(F > f_{s\max})$, הגוף מתחיל לנוע. כעת יפעל עליו כוח חיכוך קינטי קבוע, הנתון על ידי: $f_k = \mu_k N$, כאשר $N = F_G = 10m$. לכן ניתן לבטא את כוח החיכוך הפועל על הגוף המתואר באיור 7 כפונקציה של הכוח F המופעל על הגוף באמצעות הביטוי הבא:

$$f = \begin{cases} F & 0 \le F \le f_{s\max} \\ f_k & F > f_{s\max} \end{cases} \qquad (15)$$

הגרף שלפניך (איור 8) מתאר את כוח החיכוך f כפונקציה של הכוח האופקי F עבור הגוף המתואר באיור 7.

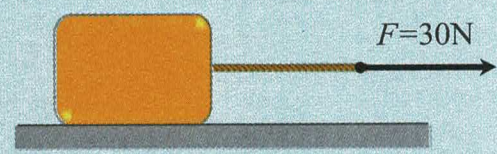


איור 8: כוח החיכוך הפועל על גוף המונח על משטח אופקי כפונקציה של הכוח האופקי הפועל עליו.

דוגמאות חישוביות בחיכוך קינטי

דוגמה 1

מפעילים כוח אופקי שגודלו 30N על גוף שמסתו 4kg המונח על משטח אופקי לא חלק, כמתואר בתרשים שלפניך.



נתון שמקדמי החיכוך הקינטי והסטטי בין הגוף למשטח הם 0.4 ו- 0.6, בהתאמה.

א. חשב את $f_{s\max}$.

ב. בדוק האם הגוף ינוע כשמפעילים עליו את הכוח הנתון (30N).

ג. חשב את הכוח השקול הפועל על הגוף בכיוון אופקי.

פתרון:

א. $f_{s\max} = \mu_s N = 0.6(40) = 24\,\text{N}$

ב. מכיוון שמתקיים $F > f_{s\max}$, הגוף ינוע כאשר מפעילים עליו כוח של 30N.

ג. $\Sigma F = F - f_k$, כאשר:

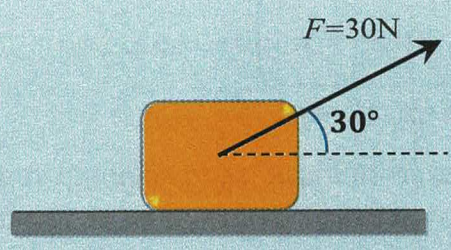
$f_k = \mu_k N = 0.4(40) = 16\,\text{N}$

לכן נקבל:

$\Sigma F = F - f_k = 30 - 16 = 14\,\text{N}$

דוגמה 2

ענה על השאלה הקודמת אם נתון שהכוח F מופעל על הגוף בכיוון היוצר זווית בת 30° עם המשטח, כמתואר בתרשים שלפניך.



א. מהחוק הראשון של ניוטון מתקיים בכיוון אנכי:

$$N = F_G - F\sin 30 = 40 - 30\sin 30 = 25\,\text{N}$$

מכאן:

$$f_{s\max} = \mu_s N = 0.6(25) = 15\,\text{N}$$

ב. על מנת לבדוק אם הגוף נע או לא יש להשוות בין F_x ו- $f_{s\max}$.

$$F_x = F\cos 30 = 30\cos 30 = 25.98\,\text{N}$$

מכיוון ש- $f_{s\max} = 15\,\text{N}$, נקבל ש- $F_x > f_{s\max}$. לכן הגוף ינוע.

ג. הכוח השקול הפועל על הגוף בכיוון אופקי הוא:

$$\Sigma F = F_x - f_k$$

כאשר:

$$F_x = F\cos 30 = 30\cos 30 = 25.98\,\text{N}$$

$$f_k = \mu_k\,\text{N} = 0.4(25) = 10\,\text{N}$$

מכאן נקבל:

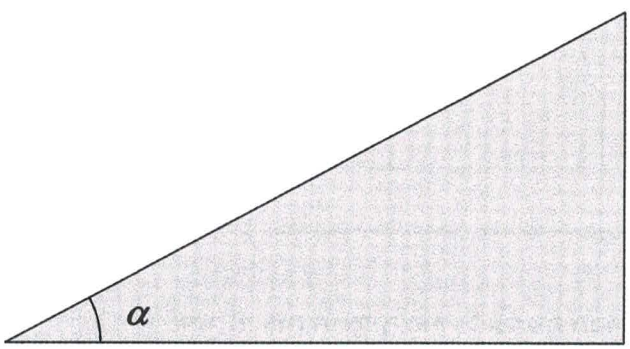
$$\Sigma F_x = 25.98 - 10 = 15.98\,\text{N}$$

5. בעיות בחוק הראשון של ניוטון על מישור משופע

המישור המשופע הוא משטח היוצר זווית עם קו האופק, כפי שמתואר באיור 9. זווית זו מסומנת בדרך כלל ב- α.

אם מניחים גוף על מישור משופע חלק, הגוף יחליק בהשפעת כוח הכובד במורד המישור המשופע וינוע בתאוצה. על מנת שהגוף יישאר במנוחה, צריך שיפעל עליו כוח נוסף היכול להחזיק אותו במנוחה. כוח זה יכול להיות, בין היתר, כוח חיכוך סטטי בין הגוף למשטח.

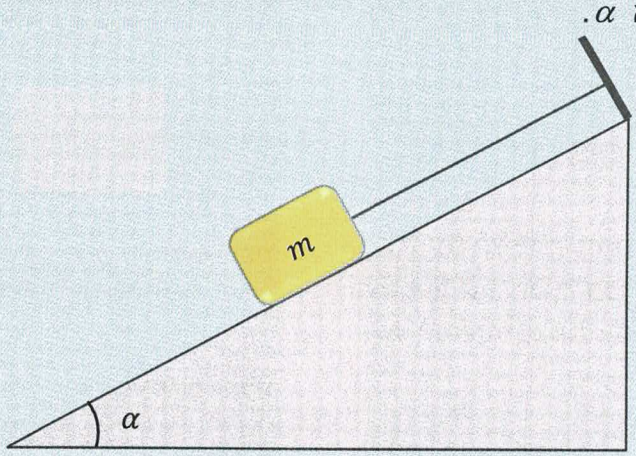
בסעיף זה נדון במספר בעיות הנוגעות לגופים הנמצאים במצב שיווי משקל על מישור משופע.



איור 9: חתך של מישור משופע.

בעיה 1

נתון גוף המונח על מישור משופע חלק. הגוף קשור באמצעות חוט למוט הנמצא בקצה העליון של המישור המשופע (ראה איור 10). נתון שהחוט מקביל למישור המשופע, שמסת הגוף m ושזווית השיפוע של המישור היא α.



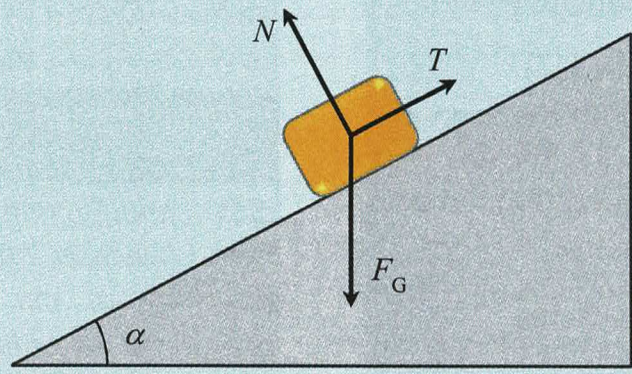
איור 10: גוף הנמצא במנוחה על מישור משופע.

א. ציין באמצעות חיצים את הכוחות הפועלים על הגוף, וליד כל חץ רשום את שם הכוח.

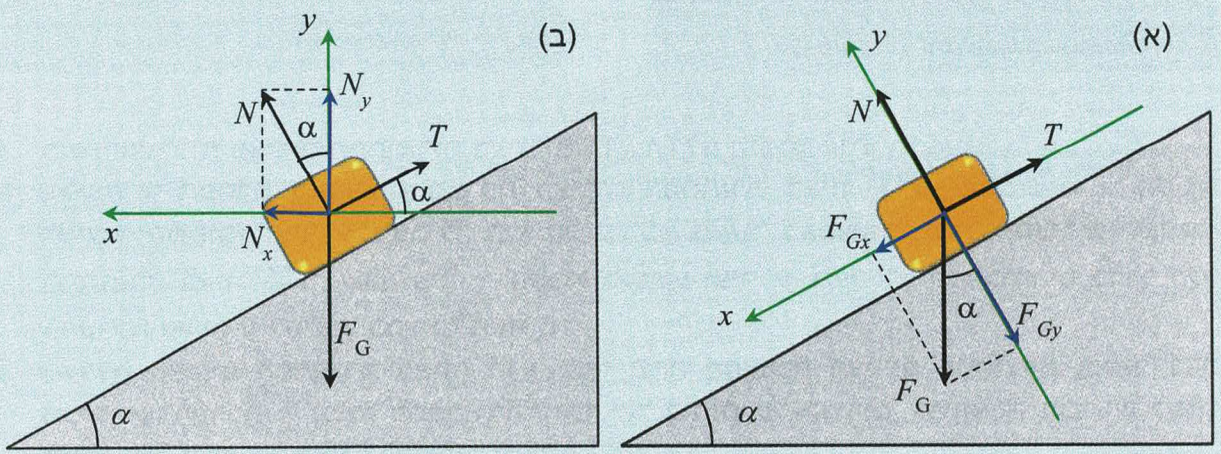
ב. בחר מערכת צירים xy מתאימה, וחשב באמצעותה את הכוחות שציינת בסעיף הקודם. בטא את תשובתך בעזרת הגדלים: m ו- α.

פתרון:

א. הכוחות הפועלים על הגוף הם כוח הכובד F_G בכיוון ניצב לקרקע, הכוח הנורמלי N בכיוון ניצב למישור המשופע והמתיחות בחוט T בכיוון המקביל למישור המשופע כלפי מעלה כפי שמתואר באמצעות חיצים בתרשים הבא:



ב. מתקיים ש-$F_G = 10m$. על מנת לבטא את הכוחות N ו-T יש לבחור מערכת צירים xy מתאימה ולהיעזר בחוק הראשון של ניוטון. ניתן לבחור מערכת צירים כלשהיא, אבל מוטב לבחור מערכת צירים מתאימה ונוחה, שמאפשרת את חישוב הכוחות בקלות יחסית. נבחן את שתי מערכות הצירים xy המתוארות באיורים 11א ו-11ב. באיור 11א ציר x מקביל למישור המשופע וכיוונו החיובי כלפי מורד המישור המשופע, וציר y ניצב לו וכיוונו החיובי כלפי מעלה. באיור 11ב ציר x מקביל לקרקע וציר y ניצב לקרקע.



איור 11: (א) מערכת צירים שבה ציר x מקביל למישור המשופע וציר y ניצב לו. (ב) מערכת צירים שבה ציר x מקביל לקרקע וציר y ניצב לקרקע.

נטפל בבעיה בעזרת שתי מערכות הצירים המתוארות באיור 11 ונשווה בין שני המקרים.

פתרון על פי מערכת הצירים המתוארת באיור 11א.

יש לשים לב שבמערכת המתוארת באיור 11א, הזווית בין כוח הכובד F_G ובין החלק השלילי של ציר y היא α (נא לבדוק). לכן לכוח הכובד יש במערכת זו את שני הרכיבים הבאים:

$$\begin{cases} F_{Gx} = F_G \sin\alpha = 10m\sin\alpha \\ F_{Gy} = -F_G \cos\alpha = -10m\cos\alpha \end{cases}$$

שים לב ש-F_{Gy} שלילי כי הוא מכוון לכיוון השלילי של הציר.

מכיוון שהמערכת נמצאת במנוחה, נקבל על פי החוק הראשון של ניוטון שבכיוון ציר x מתקיים:

$$\Sigma F_x = 0$$
$$\Rightarrow F_{Gx} + T = 0$$
$$\Rightarrow F_G \sin\alpha + T = 0$$
$$\Rightarrow T = -F_G \sin\alpha = -10m\sin\alpha$$

ובכיוון ציר y מתקיים:

$$\Sigma F_y = 0$$
$$\Rightarrow N + F_{Gy} = 0$$
$$\Rightarrow N + \left(-F_G \cos\alpha\right) = 0$$
$$\Rightarrow N = F_G \cos\alpha = 10m\cos\alpha$$

פתרון על פי מערכת הצירים המתוארת באיור 11ב.

במערכת הצירים המתוארת באיור 11ב, הזווית בין הכוח הנורמלי N והחלק החיובי של ציר y היא α, כמו גם הזווית בין המתיחות T והחלק השלילי של ציר x, שגם היא α (ראה איור 11ב).

מאחר והמערכת נמצאת בשווי משקל נקבל שבכיוון ציר x:

$$\Sigma F_x = 0$$
$$\Rightarrow N_x + T_x = 0$$
$$\Rightarrow N\sin\alpha + \left(-T\cos\alpha\right) = 0$$
$$\Rightarrow T = N\tan\alpha \quad (16)$$

בכיוון ציר y מתקיים:

$$\Sigma F_y = 0$$
$$\Rightarrow N_y + T_y + F_{Gy} = 0$$
$$\Rightarrow N\cos\alpha + T\sin\alpha + \left(-10m\right) = 0$$
$$\Rightarrow N\cos\alpha + T\sin\alpha = 10m \quad (17)$$

שתי המשוואות (16) ו-(17) הן שתי משוואות בשני נעלמים (N ו-T). נציב את T ממשוואה (16) במשוואה (17) ונקבל:

$$N\cos\alpha + N\tan\alpha\sin\alpha = 10m$$
$$\Rightarrow N\left(\cos\alpha + \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}\sin\alpha\right) = 10m$$
$$\Rightarrow N\left(\frac{\cos^2\alpha + \sin^2\alpha}{\cos\alpha}\right) = 10m$$
$$\Rightarrow N = 10m\cos\alpha$$

זאת כאשר נעזרנו בזהות:

$$\cos^2\alpha + \sin^2\alpha = 1.$$

נציב את N במשוואה (16) ונקבל:

$$T = \left(10m\cos\alpha\right)\tan\alpha = 10m\sin\alpha$$

סיכום:

1. בשתי מערכות הצירים המתוארות באיורים 11א ו-11ב קיבלנו אותן תוצאות.
2. בבעיה זו הפתרון באמצעות מערכת הצירים המתוארת באיור 11א, שבה ציר x מקביל למישור המשופע וציר y ניצב לו, הוא קל בהרבה מאשר באמצעות מערכת הצירים השנייה, המתוארת באיור 11ב, שבה ציר x מקביל לקרקע וציר y ניצב לו. לכן בוחרים בדרך כלל במערכת צירים זו לטיפול בבעיות מסוג זה.
3. מערכת הצירים המתוארת באיור 11א יותר נוחה ממערכת הצירים המתוארת באיור 11ב מכיוון שבמערכת זו נמצא מספר גדול יותר של כוחות על הצירים, וכתוצאה מכך יש לפרק מספר קטן יותר של כוחות לרכיבים ניצבים.

מסקנה: בשימוש בחוק הראשון של ניוטון, מערכת הצירים הנוחה ביותר היא מערכת הצירים שבה נמצאים על הצירים המספר הגדול ביותר של כוחות.

בעיה 2

מניחים גוף על מישור משופע לא חלק. בגלל החיכוך בין הגוף למישור המשופע, הגוף נשאר במנוחה.

נתון שמסת הגוף היא m, זווית השיפוע של המישור המשופע היא α ומקדם החיכוך הסטטי בין הגוף למשטח הוא μ_s.

א. שרטט את הגוף וציין באמצעות חיצים את הכוחות הפועלים עליו. ליד כל חץ רשום את שם הכוח.

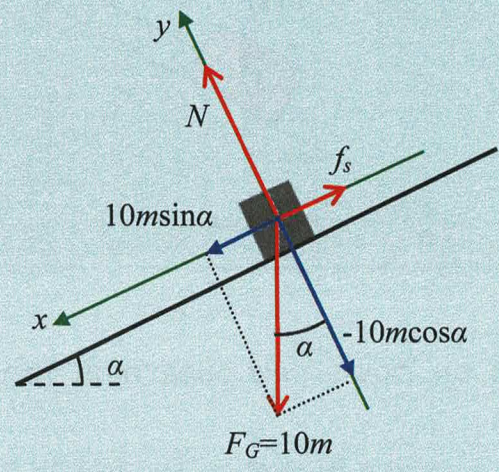
ב. בחר מערכת צירים מתאימה ומצא באמצעותה את הכוחות שציינת בסעיף א'. בטא את תשובתך באמצעות הגדלים m ו-α.

ג. אם מתחילים להגדיל את זווית השיפוע של המישור המשופע בהדרגה, מגלים שמגיעים לזווית מקסימלית α_{max}, שלאחריה הגוף מתחיל לנוע. מצא את הזווית α_{max}. בטא את תשובתך באמצעות μ_s.

ד. חשב את α_{max} עבור $\mu_s = 1$.

פתרון:

א. על הגוף פועלים הכוחות הבאים: כוח הכובד $F_G = 10m$ בכיוון ניצב לקרקע כלפי מטה, הכוח הנורמלי N בכיוון הניצב למישור המשופע וכוח החיכוך הסטטי f_s בכיוון המקביל למישור המשופע בכיוון מעלה המישור. כוחות אלה מתוארים באמצעות חיצים בתרשים הבא:



ב. נבחר מערכת צירים שבה ציר x מקביל למישור המשופע וציר y ניצב לו, כפי שמתואר בתרשים הקודם. מערכת זו עדיפה משום שרוב הכוחות נמצאים בה על הצירים.

מכיוון שהגוף נמצא במנוחה, נקבל על פי החוק הראשון של ניוטון שבכיוון ציר y:

$$\Sigma F_y = 0$$
$$\Rightarrow N + F_{Gy} = 0$$
$$\Rightarrow N + (-10m\cos\alpha) = 0$$
$$\Rightarrow N = 10m\cos\alpha \quad (18)$$

מהחוק הראשון של ניוטון נקבל בכיוון ציר x

$$\Sigma F_x = 0$$
$$\Rightarrow F_{Gx} + f_s = 0$$
$$\Rightarrow 10m\sin\alpha + f_s = 0$$
$$\Rightarrow f_s = -10m\sin\alpha \quad (19)$$

ג. התנאי שהגוף לא יחליק הוא שיתקיים: $F_{Gx} \le f_{s\max}$. כאשר:

$$F_{Gx} = 10m\sin\alpha$$
$$f_{s\max} = \mu_s N = \mu_s (10m\cos\alpha)$$

נציב F_{Gx} ו- $f_{s\max}$ בתנאי $F_{Gx} \le f_{s\max}$ ונקבל:

$$10m\sin\alpha \le \mu_s (10m\cos\alpha)$$
$$\Rightarrow \tan\alpha \le \mu_s$$

כל עוד מתקיים $\tan\alpha \le \mu_s$, הגוף לא יחליק ויישאר במנוחה. הערך המקסימלי של הזווית שעבורה הגוף אינו מחליק $(\alpha_{\max})$ מתקבל עבור השוויון:

$$\tan\alpha_{\max} = \mu_s$$

ד. נציב בקשר האחרון $\mu_s = 1$ ונקבל:

$$\tan\alpha_{\max} = 1 \Rightarrow \alpha_{\max} = 45^\circ$$

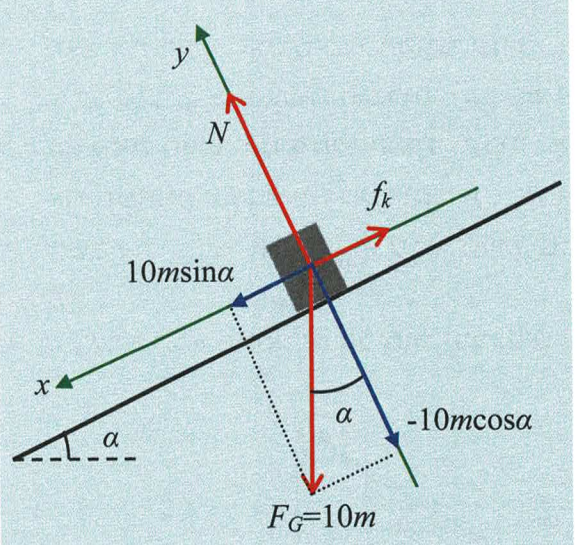
בעיה 3

גוף מחליק במהירות קבועה על מישור משופע לא חלק. נתון שמקדם החיכוך הקינטי בין הגוף והמשטח הוא 0.4. חשב את זווית השיפוע של המישור המשופע.

פתרון:

בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על הגוף ומערכת הצירים xy שבחרנו. בתרשים מתוארים גם הרכיבים של כוח הכובד:

$$\begin{cases} F_{Gx} = 10m\sin\alpha \\ F_{Gy} = -10m\cos\alpha \end{cases}$$



במערכת זו מתקיים $N = 10m\cos\alpha$, ולכן נקבל:

$$f_k = -\mu_k N = -\mu_k (10m\cos\alpha)$$

שים לב: f_k שלילי כי הוא מכוון בכיוון השלילי של ציר x.

מכיוון שהגוף מחליק במהירות קבועה, מתקיים בכיוון ציר x:

$\Sigma F_x = 0$

$\Rightarrow F_{Gx} + f_k = 0$

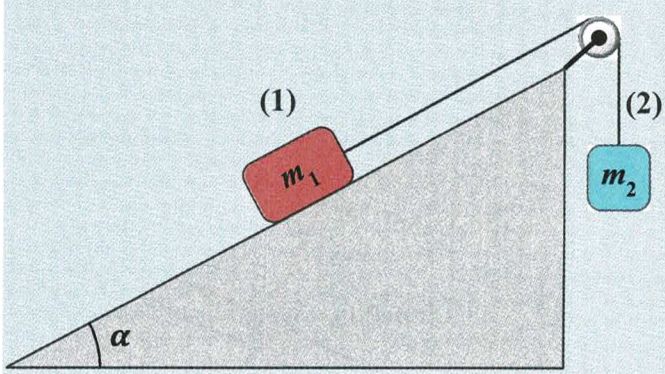
$\Rightarrow 10m\sin\alpha + \left[-\mu_k\left(10m\cos\alpha\right)\right] = 0$

$\Rightarrow \tan\alpha = \mu_k$

מכיוון ש- $\mu_k = 0.4$ נקבל:

$\tan\alpha = 0.4 \Rightarrow \alpha = 21.8^\circ$

בעיה 4



בתרשים שלפניך מתואר מישור משופע שזווית השיפוע שלו α. על המישור המשופע מונח גוף 1 שמסתו m_1. גוף זה קשור לקצה חוט שמסתו זניחה. החוט כרוך סביב גלגלת אידיאלית המהודקת בקצה העליון של המישור המשופע. לקצה האחר של החוט קשור גוף 2 שמסתו m_2, והוא נמצא באוויר. נתון שקטע החוט הנמצא בין גוף 1 והגלגלת מקביל למישור המשופע (ראה תרשים).

א. מצא מהו היחס m_2/m_1 הדרוש על מנת שהמערכת תהיה במצב שיווי משקל, אם נתון שהמישור המשופע חלק.

ב. חשב את גודלו של m_2 במצב המתואר בסעיף הקודם אם נתון: $m_1 = 2\,\text{kg}$ ו- $\alpha = 30^\circ$.

נניח כעת שהמישור המשופע אינו חלק, ושמקדם החיכוך הסטטי בין m_1 והמישור המשופע הוא μ_s.

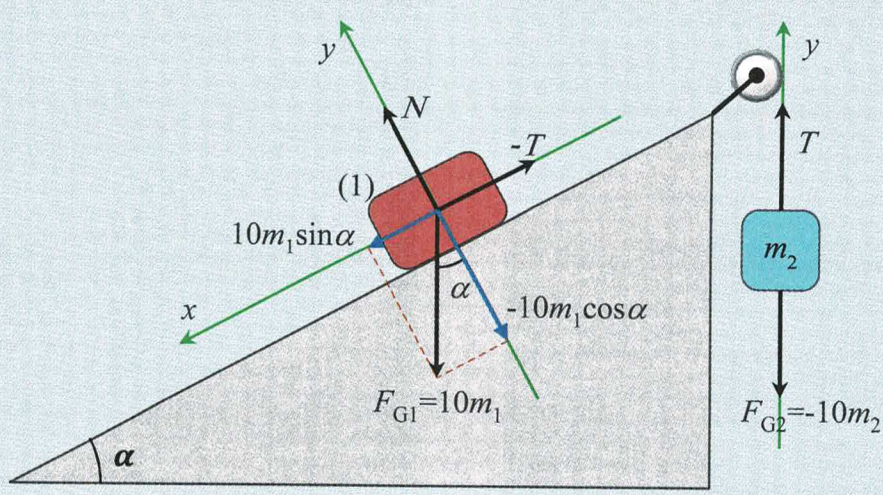
ג. מצא את הערך המקסימלי המותר עבור m_2 $(m_{2\max})$ על מנת שהמערכת תישאר במנוחה. בטא את תשובתך באמצעות הגדלים: μ_s, m_1 ו- α.

ד. מצא את הערך המינימלי המותר עבור m_2 $(m_{2\min})$ על מנת שהמערכת תישאר במנוחה. בטא את תשובתך באמצעות הגדלים: μ_s, m_1 ו- α.

ה. חשב את $m_{2\max}$ ואת $m_{2\min}$ עבור הערכים: $m_1 = 2\,\text{kg}$, $\alpha = 30^\circ$ ו- $\mu_s = 0.5$.

פתרון:

א. בתרשים הבא מתוארים הכוחות הפועלים על שני הגופים ומערכת צירים שנבחרה:



משיקולי שווי משקל של גוף 1 נקבל שבכיוון ציר x:

$10m_1\sin\alpha + (-T) = 0 \Rightarrow T = 10m_1\sin\alpha$

משווי המשקל של גוף 2 נקבל:

$$T+(-10m_2)=0 \Rightarrow T=10m_2$$

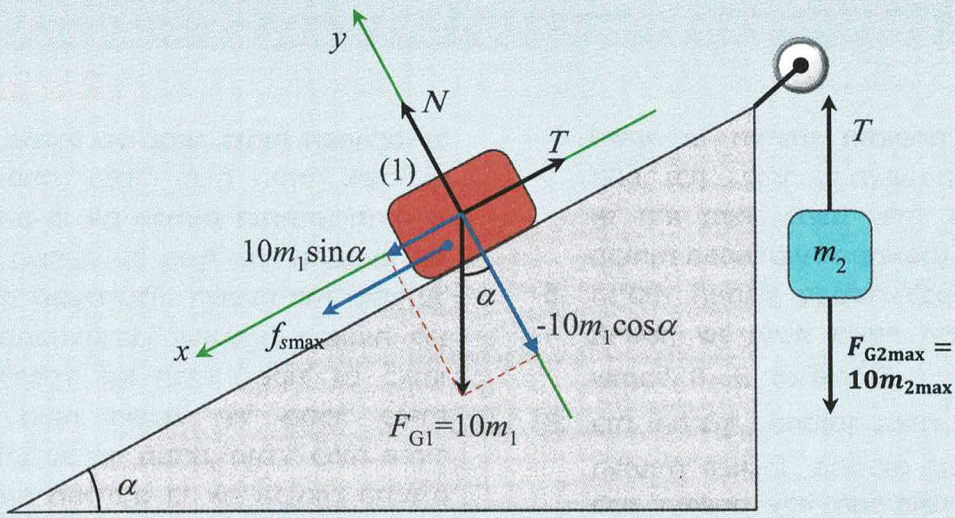
מהשוואת שתי המשוואות האחרונות נקבל:

$$10m_2=10m_1\sin\alpha \Rightarrow m_2=m_1\sin\alpha$$

ב. נציב את הערכים בקשר שקיבלנו בסעיף הקודם ונקבל:

$$m_2=(2\,\text{kg})\sin 30=1\,\text{kg}$$

ג. אם נגדיל את m_2 בהדרגה, נגיע לערך מקסימלי ל-m_2 $(m_{2\max})$ שעבורו המערכת נמצאת עדיין במנוחה, אבל תהיה על סף תנועה בכיוון מעלה המישור המשופע. במצב זה יש לחיכוך הסטטי בין גוף 1 והמישור המשופע ערך מקסימלי $(f_{s\max})$ וכיוונו בכיוון מורד המישור המשופע (ראה את התרשים הבא).



במערכת זו מתקיים:

$$10m_{2\max}=10m_1\sin\alpha+f_{s\max}$$

כאשר: $f_{s\max}=\mu_s N=\mu_s(10m_1\cos\alpha)$. נציב $f_{s\max}$ במשוואה האחרונה ונקבל:

$$10m_{2\max}=10m_1\sin\alpha+\mu_s(10m_1\cos\alpha)$$

$$\Rightarrow m_{2\max}=m_1(\sin\alpha+\mu_s\cos\alpha)$$

ד. אם נקטין את m_2 בהדרגה, נגיע לערך מינימלי ל-m_2 $(m_{2\min})$ שעבורו המערכת נמצאת עדיין במנוחה, אבל תהיה על סף תנועה בכיוון מורד המישור המשופע. במצב זה יש לחיכוך הסטטי בין גוף 1 והמישור המשופע ערך מקסימלי $(f_{s\max})$ וכיוונו בכיוון מעלה המישור המשופע (ראה את התרשים הבא). במערכת זו מתקיים:

$$10m_{2\min}+f_{s\max}=10m_1\sin\alpha$$

כאשר: $f_{s\max}=\mu_s(10m_1\cos\alpha)$. נציב $f_{s\max}$ במשוואה האחרונה ונקבל:

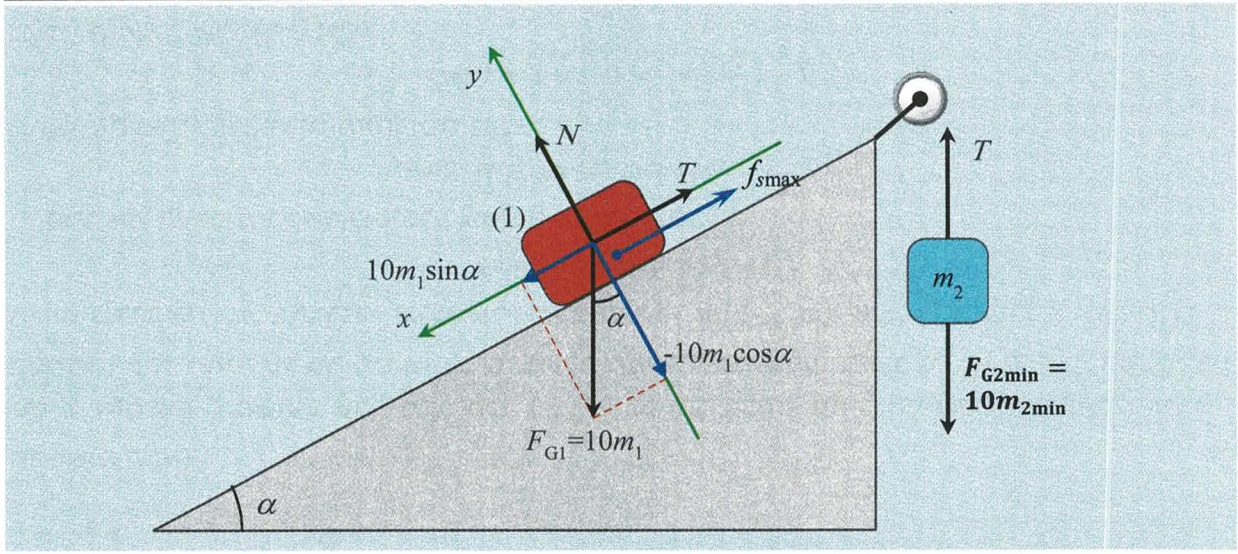
$$10m_{2\min}+\mu_s(10m_1\cos\alpha)=10m_1\sin\alpha$$

$$\Rightarrow m_{2\min}=m_1(\sin\alpha-\mu_s\cos\alpha)$$

ה. נציב את הערכים ונקבל:

$$m_{2\max}=(2\,\text{kg})(\sin 30+0.5\cos 30)=1.866\,\text{kg}$$

$$m_{2\min}=(2\,\text{kg})(\sin 30-0.5\cos 30)=0.134\,\text{kg}$$



סיכום פרק 6

1. הכוח השקול של מספר כוחות הפועלים על גוף מסוים, מוגדר ככוח היחיד אשר אם מחליפים בו את הכוחות הנתונים, תהיה לו אותה השפעה על הגוף כמו ההשפעה של הכוחות שפעלו עליו. השפעת כוח שקול על הגוף מתבטאת בכך שהגוף נע בתאוצה. לכן ניתן להגדיר את הכוח השקול גם באופן הבא: הכוח השקול של מספר כוחות הפועלים על גוף מסוים, מוגדר ככוח היחיד אשר אם מחליפים בו את הכוחות הנתונים יגרום לגוף לנוע באותה תאוצה שהייתה לו בהשפעת הכוחות שפעלו עליו מקודם.
2. אם נתונים מספר כוחות הפועלים על גוף מסוים, $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$, $\vec{F}_3$, ..., הכוח השקול של כוחות אלה, המסומן ב-$\Sigma\vec{F}$, הוא הסכום הוקטורי שלהם, כלומר:
$\Sigma\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \cdots$.
3. החוק הראשון של ניוטון: אם לא פועלים על גוף מסוים כוחות, או פועלים עליו מספר כוחות שהשקול שלהם מתאפס, הגוף יהיה במנוחה או ינוע במהירות קבועה (כלומר ינוע בקו ישר במהירות שגודלה קבוע).
גוף שמהירותו שווה לאפס או נע במהירות קבועה (גודל וכיוון), הוא גוף שתאוצתו שווה לאפס. לכן ניתן לנסח את החוק הראשון של ניוטון בניסוח נוסף, והוא: אם הכוח השקול על גוף מסוים מתאפס אז גם תאוצתו מתאפסת.
4. **הגדרה:** גוף הנמצא במצב **שיווי משקל** הוא גוף ששקול הכוחות הפועלים עליו מתאפס. על פי הגדרה זו ניתן לנסח את החוק הראשון של ניוטון גם כך: אם הגוף נמצא במצב שיווי משקל אז תאוצתו מתאפסת. כמובן, גם ההפך נכון, כלומר אם תאוצת הגוף מתאפסת אז הוא נמצא במצב שיווי משקל (שקול הכוחות הפועלים עליו מתאפס).
5. הניסוח האחרון מאפשר לבטא את החוק הראשון של ניוטון בשפת המתמטיקה, כך שנקבל: $\Sigma\vec{F} = 0 \Leftrightarrow \vec{a} = 0$.
6. כוח החיכוך, המסומן באות f מהמילה הלועזית friction, הוא כוח הפועל בין הגוף לבין המשטח עליו הוא מונח כאשר הגוף נמצא בתנועה על המשטח או במנוחה אבל הוא נוטה לתנועה. כיוון כוח זה הוא תמיד מקביל למשטח עליו נמצא הגוף, וכיוונו מנוגד תמיד לכיוון תנועת הגוף, או לכיוון אליו הגוף נוטה לנוע. כוח זה נובע מאינטראקציה בין הגוף לבין המשטח עליו הוא מונח שבמהלכה הגוף מפעיל כוח על המשטח בכיוון תנועתו או בכיוון הנטייה שלו לנוע, ועל פי החוק השלישי של ניוטון, המשטח מפעיל על הגוף כוח השווה בגודלו ומנוגד בכיוונו לכוח הנ"ל.
7. מקור כוח החיכוך הוא האינטראקציה בין החלק התחתון של הגוף ובין המשטח עליו הגוף מונח. אינטראקציה זו נובעת משתי סיבות עיקריות: (1) כוחות אלקטרומגנטיים (כוחות בין המטענים החשמליים באזור המגע בין הגוף והמשטח). כוחות אלה גורמים להופעת כוח שקול המתנגד לתנועה. (2) כוחות מכניים הנובעים מאחיזה בין הבליטות המיקרוסקופיות המצויות הן על הגוף והן על המשטח באזור המגע ביניהם. אחיזה זו מייצרת כוחות מכניים המעכבים את התנועה.

8. **כוח החיכוך הסטטי** הוא כוח החיכוך הפועל בין גוף ובין המשטח עליו מונח הגוף, כשהגוף נמצא במנוחה, אבל יש לו נטייה לנוע, כלומר פועל עליו כוח חיצוני המנסה לגרום לו לנוע. כוח החיכוך הסטטי מסומן ב- f_s מהלועזית Static friction.
9. כוח החיכוך הסטטי גדל ככל שהכוח החיצוני הפועל על הגוף גדל עד לערך מקסימלי מסוים המסומן $f_{s\max}$ שמעבר לו החיכוך הסטטי אינו יכול לגדול. ערך זה נתון על ידי הביטוי: $f_{s\max}=\mu_s N$ כאשר μ_s הוא מקדם הפרופורציה בין $f_{s\max}$ ו- N. קבוע זה נקרא **מקדם החיכוך הסטטי**.
10. מתקיים: μ_s הוא גודל חסר יחידות והוא תלוי בסוגי החומרים מהם עשויים הגוף והמשטח עליו מונח הגוף. גודל זה מתקבל מניסויים.
11. כוח החיכוך הפועל בין הגוף למשטח כאשר הגוף נמצא בתנועה, נקרא כוח **החיכוך הקינטי**. כוח זה מסומן ב- f_k מהלועזית kinetic friction.
12. על סמך הניסויים גילו הפיזיקאים שלרוב גודלו של החיכוך הקינטי קטן מהחיכוך הסטטי המקסימלי. במקרים אחדים הוא שווה לו. לכן ניתן לרשום ש- $f_k \le f_{s\max}$.
13. על סמך הניסויים התקבל שהחיכוך הקינטי נמצא ביחס ישר לכוח הנורמלי המופעל על הגוף, כך שמתקיים: $f_k=\mu_k N$, כאשר μ_k הוא מקדם הפרופורציה בין f_k ו- N. קבוע זה נקרא **מקדם החיכוך הקינטי**. μ_k הוא גודל חסר יחידות והוא תלוי בסוגי החומרים מהם עשויים הגוף והמשטח עליו מונח הגוף. מכיוון שמתקיים ש- $f_k \le f_{s\max}$, נקבל ש- $\mu_k \le \mu_s$.
14. בשימוש בחוק הראשון של ניוטון, מערכת הצירים הנוחה ביותר היא מערכת הצירים שבה נמצאים על הצירים המספר הגדול ביותר של כוחות.

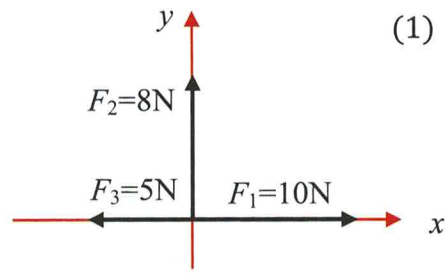
תרגילים ובעיות – פרק 6

1. הכוח השקול

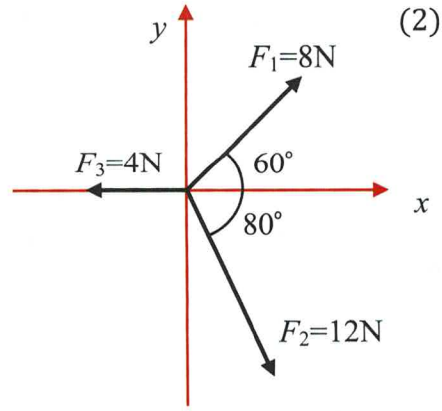
1.

חשב את גודלו וכיוונו של הכוח השקול במקרים הבאים:

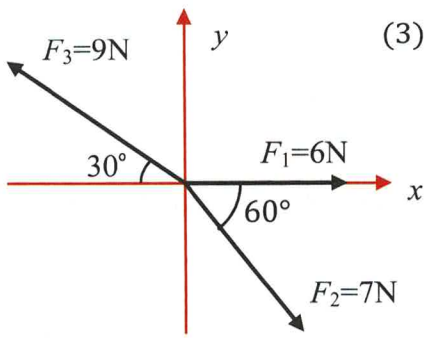
(1)



(2)

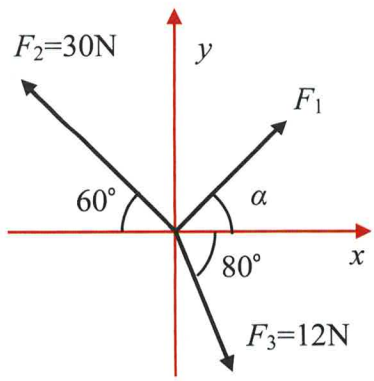


(3)



2.

נתון ששקול הכוחות המתוארים בתרשים הבא מתאפס. חשב את גודלו וכיוונו של הכוח $\vec{F}_1$.



2. החוק הראשון של ניוטון

3.

א. רשום את החוק הראשון של ניוטון.

ב. נתון גוף שתאוצתו שווה לאפס. תאר את מצבו של גוף זה:

1. באמצעות גדלים קינטיים.
2. על ידי שימוש בכוחות.

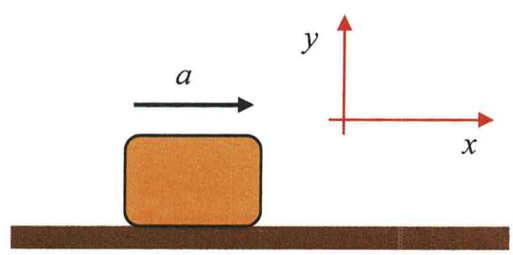
4.

א. הסבר, על סמך החוק הראשון של ניוטון, מדוע כאשר אנו נוסעים במכונית הנעה במהירות קבועה, הגוף שלנו נהדף קדימה כאשר המכונית בולמת בפתאומיות.

ב. הסבר, על סמך החוק הראשון של ניוטון, מדוע כאשר אנו יושבים במכונית הנמצאת במנוחה, הגוף שלנו נהדף אחורה כאשר המכונית מאיצה בפתאומיות.

5.

גוף נע על משטח אופקי בתאוצה a, כפי שמתואר בתרשים שלפניך.



א. קבע על איזה מהצירים מתקיים החוק הראשון של ניוטון. מה ניתן להסיק לגבי סכום הכוחות בכיוון זה?

ב. קבע על איזה מהצירים לא מתקיים החוק הראשון של ניוטון. מה ניתן להסיק לגבי סכום הכוחות בכיוון זה?

6.

נתון גוף הנמצא במצב שיווי משקל. איזה מבין התיאורים הבאים אינו מתקיים עבור הגוף:

א. הגוף נמצא במנוחה.

ב. הגוף נע בתאוצה קבועה.

ג. סכום הכוחות הפועלים על הגוף אינו מתאפס.

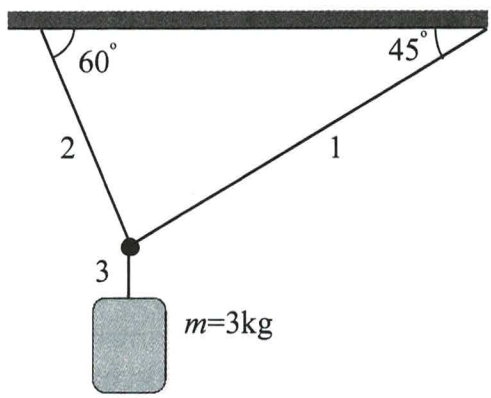
ד. מהירות הגוף קבועה (גודל וכיוון).

3. בעיות בנושא החוק הראשון של ניוטון

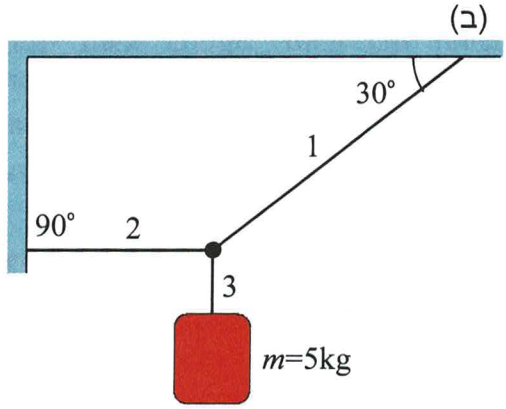
7.

חשב את המתיחויות בחוטים במקרים המתוארים בתרשימים שלפניך.

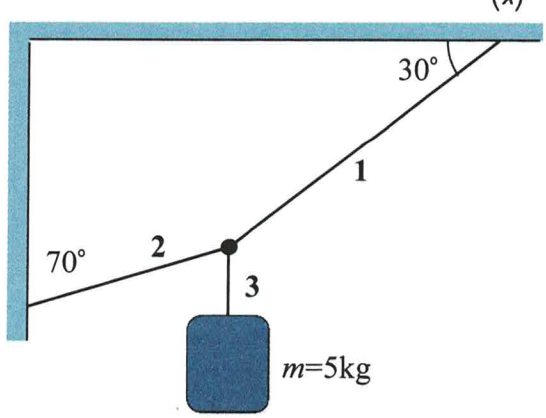
(א)



(ב)



(ג)



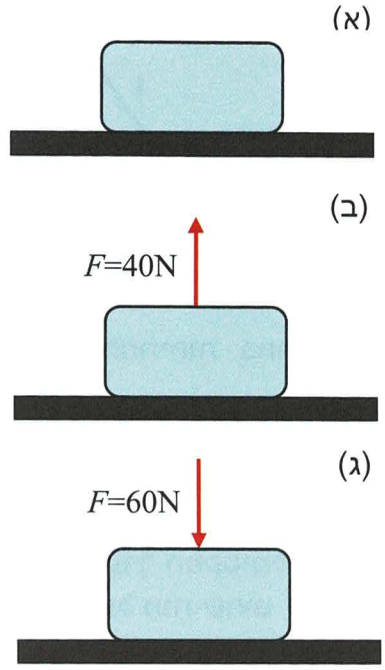
8.

כאשר מושכים בחבל ארוך (שמסתו אינה זניחה) משני קצותיו. החבל תמיד נשאר עקום כלפי מטה לא משנה כמה חזק אנו מושכים בשני הקצוות שלו. הסבר מדוע.

9.

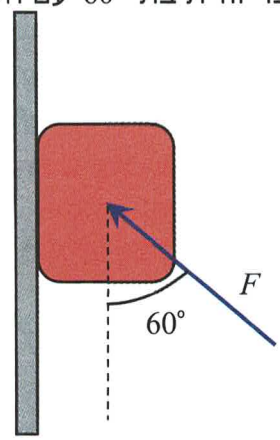
חשב את הכוח הנורמלי המופעל על הגוף

בכל אחד מהמקרים הבאים. נתון שמסת הגוף $10\,\text{kg}$.



10.

הגוף שבתרשים מוחזק במנוחה על קיר אנכי חלק, באמצעות הפעלת כוח עליו שגודלו $100\,\text{N}$ והיוצר זווית בת 60° עם הקיר.



א. חשב את מסת הגוף.

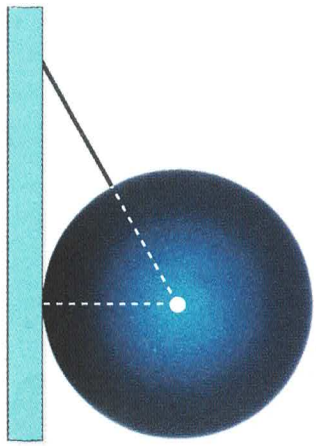
ב. חשב את גודל וכיוון הכוח הנורמלי שהקיר מפעיל על הגוף.

ג. חשב את גודל וכיוון הכוח שהגוף מפעיל על הקיר.

11.

בתרשים שלפניך מתואר כדור הקשור לקצה חוט. הקצה האחר של החוט קשור לנקודה קבועה בקיר אנכי כך שהכדור נשען על הקיר ונמצא במצב שיווי משקל.

נתון שמסת הכדור $4\,\text{kg}$, שרדיוסו $0.4\,\text{m}$ ושאורך החוט $0.4\,\text{m}$. נתון שהמשך הקו המחבר בין נקודת האחיזה של החוט בקיר לנקודת האחיזה שלו בכדור עובר דרך מרכז הכדור (ראה תרשים). נתון גם שמסת החוט זניחה ושהקיר חלק.



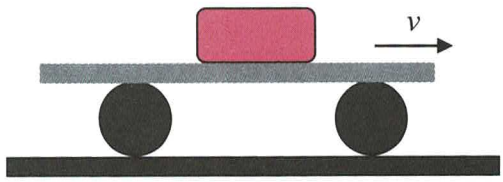
א. חשב את גודל הזווית בין החוט לקיר האנכי.

ב. חשב את המתיחות בחוט.

ג. חשב את גודלו ואת כיוונו של הכוח שהכדור מפעיל על הקיר.

12.

גוף מונח על עגלה הנוסעת במהירות קבועה על משטח אופקי, כפי שמתואר בתרשים הבא:



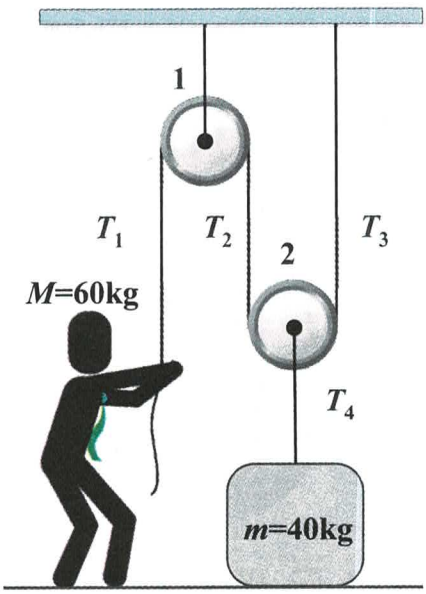
א. מהם הכוחות הפועלים על הגוף בכיוון אנכי.

ב. מהם הכוחות הפועלים על הגוף בכיוון אופקי.

13.

המערכת המתוארת בתרשים שלפניך מורכבת משתי גלגלות אידיאליות. גלגלת 1 קשורה באמצעות חוט לתקרה וגלגלת 2 קשורה באמצעות חוט אחר לגוף שמסתו $m=40\,\text{kg}$ המונח על הרצפה. חוט שלישי הקשור לתקרה כרוך סביב שתי הגלגלות ומגיע לידיו של תלמיד שמסתו $M=60\,\text{kg}$ העומד על הרצפה (ראה תרשים). במערכת זו

הגלגלת 1 קבועה במקומה, ולעומתה הגלגלת 2 יכולה לשנות את מקומה אם התלמיד מושך בחוט.



נתון שהחוטים אידיאליים, וכל חלקיהם הישרים מקבילים זה לזה וניצבים לרצפה.

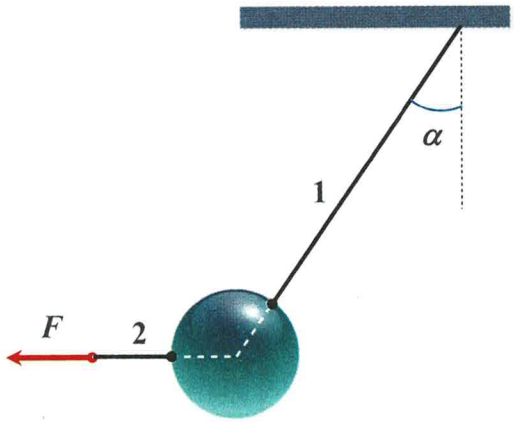
א. התלמיד מפעיל על קצה החוט בו הוא מחזיק כוח שגודלו $100\,\mathrm{N}$ בכיוון מטה. חשב את:
1) הכוח הנורמלי שהרצפה מפעילה על הגוף m.
2) הכוח הנורמלי שהרצפה מפעילה על התלמיד.

ב. חשב את הגודל המקסימלי המותר עבור הכוח שהתלמיד מפעיל על החוט כלפי מטה על מנת שהגוף יישאר על הרצפה.

ג. חשב את הכוח הנורמלי המופעל על התלמיד כאשר התלמיד מפעיל על החוט את הכוח המקסימלי שחישבת בסעיף הקודם.

.14

גוף שמסתו $m=50\,\mathrm{kg}$ קשור באמצעות חוט 1 לנקודה קבועה בתקרה. קושרים את הגוף גם לקצה חוט 2, ומושכים בקצה האחר שלו כך שהגוף זז ממקומו. עקב כך נוצרת זווית α בין החוט 1 לבין האנך לתקרה (ראה תרשים). במהלך הזזת הגוף ממקומו מקפידים על כך שחוט 2 נשאר אופקי. נתון שמסות שני החוטים זניחות.



א. בטא את המתיחות בחוט 1 באמצעות הזווית α.

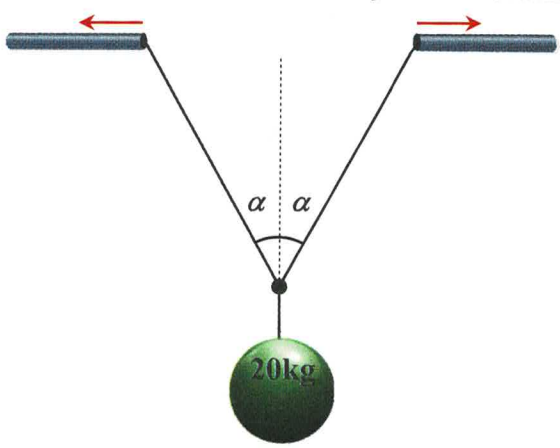
ב. מגדילים בהדרגה את הזווית α. קבע האם עקב כך המתיחות בחוט 1 גדלה, קטנה או שאינה משתנה.

ג. חשב את הערך המקסימלי האפשרי עבור הזווית α על מנת שחוט 1 לא ייקרע, אם נתון שחוט זה יכול לשאת מתיחות מקסימלית של $800\,\mathrm{N}$.

ד. חשב את המתיחות בחוט 2 כאשר הזווית מגיעה לערך המקסימלי שלה, אותו חישבת בסעיף הקודם.

.15

קושרים גוף שמסתו $m=20\,\mathrm{kg}$ לשני הקצוות של שני חוטים זהים בעלי אורך זהה, ואת שני הקצוות האחרים של שני החוטים קושרים לקצוות שני מוטות הנמצאים במצב אופקי באותו גובה מעל הרצפה.



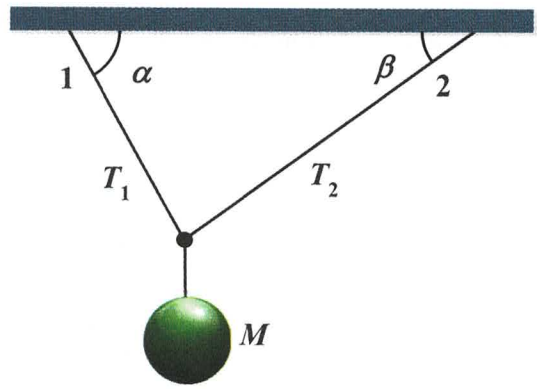
ניתן לשנות את המרחק בין המוטות, ועקב כך הזווית 2α בין שני החוטים משתנה (ראה תרשים).

א. הראה שככל שהזווית α גדלה, המתיחות בחוטים גדלה גם כן.

ב. חשב את הערך המקסימלי האפשרי עבור הזווית α אם נתון שכל אחד משני החוטים יכול לשאת כוח מקסימלי של $150\,\mathrm{N}$.

16.

במערכת המתוארת בתרשים שלפניך נתון שהחוטים אידיאליים.



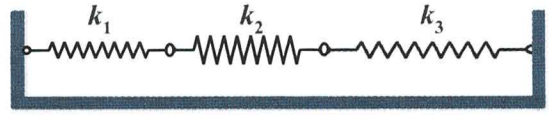
א. הראה שאם מתקיים ש-$\alpha > \beta$, אזי מתקיים ש-$T_1 > T_2$, כאשר T_1 היא המתיחות בחוט 1 ו-T_2 היא המתיחות בחוט 2 (ראה תרשים).

ב. חשב את המתיחויות T_1 ו-T_2 אם נתון $M = 20\,\mathrm{kg}$, $\alpha = 60^\circ$ ו-$\beta = 40^\circ$.

ג. נתון שכל אחד משני החוטים 1 ו-2 יכול לשאת מתיחות מקסימלית של $200\,\mathrm{N}$. חשב את הערך המקסימלי המותר עבור המסה M על מנת שאף אחד משני החוטים לא ייקרע.

17.

קושרים את הקצוות של שלושה קפיצים שונים 1, 2 ו-3 זה לזה, וקושרים את הקצוות של הקפיצים החיצוניים לשתי נקודות קבועות בשני קירות מקבילים, כפי שמתואר בתרשים שלפניך.



נתון $k_1 = 25\,\mathrm{N/m}$, $k_2 = 20\,\mathrm{N/m}$ ו-$k_3 = 10\,\mathrm{N/m}$. נתון גם שהתארכות הקפיץ 1 במצב המתואר בתרשים היא $10\,\mathrm{cm}$.

חשב את התארכות שני הקפיצים האחרים.

18.

קושרים קצה אחד של קפיץ לנקודה קבועה בסטנד ולקצה האחר שלו קושרים גוף שמסתו $1.2\,\mathrm{kg}$. הקפיץ מתארך ב-$12\,\mathrm{cm}$. לאחר מכן מכניסים את הגוף (כשהוא עדיין קשור לקפיץ התלוי) אל כלי המכיל מים והנמצא על מאזניים למדידת כוח כך שהגוף אינו נוגע בכלי (ראה תרשים). כתוצאה מכך התארכות הקפיץ קטנה ל-$10\,\mathrm{cm}$, וזאת כתוצאה מכוח העילוי שהנוזל מפעיל על הגוף כלפי מעלה. כוח זה מסומן ב-F_B.

נתון שמסת הכלי כולל המים שבתוכו היא $1.4\,\mathrm{kg}$.

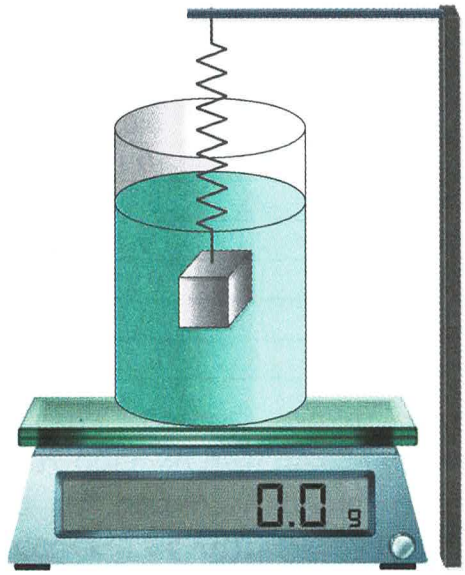
א. חשב את קבוע הקפיץ.

ב. חשב את גודלו של כוח העילוי F_B שפעל על הגוף הנמצא במים.

ג. חשב את קריאת המאזניים לפני ואחרי הכנסת הגוף אל המים.

ד. מכניסים אל המים גוף אחר הקשור לאותו קפיץ. כתוצאה מכך הקפיץ מתכווץ ב-$4\,\mathrm{cm}$ יחסית למצב הרפוי. חשב את כוח העילוי במקרה זה.

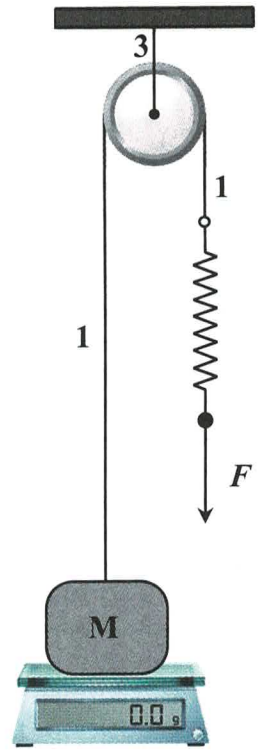
ה. חשב את קריאת המאזניים במצב המתואר בסעיף הקודם.



19.

תלמיד מניח גוף על מאזני כוח המונחים על משטח אופקי. הוא קושר את הגוף לקצה חוט ארוך, וכורך את החוט סביב גלגלת הקשורה

לתקרה באמצעות חוט אחר.



התלמיד מחבר את הקצה השני של החוט לקצה קפיץ ומפעיל כוחות שונים על הקצה החופשי של הקפיץ כלפי מטה (ראה תרשים). כתוצאה מכך הקפיץ מתארך וקריאת המאזניים משתנה.

התלמיד מודד את קריאת המאזניים W כפונקציה של התארכות הקפיץ $\Delta\ell$. להלן התוצאות שקיבל התלמיד:

W(N)	$\Delta\ell$(m)
35	0.05
30	0.1
25	0.15
20	0.2
15	0.25
10	0.3
5	0.35

א. מהו הגודל הפיזיקלי שמאזני הכוח מודדים? הסבר את תשובתך.

ב. שרטט גרף המתאר את תוצאות הניסוי (W כפונקציה של $\Delta\ell$).

ג. הסתמך על חוקי הפיזיקה וכתוב את הקשר המתמטי המתאר את W כפונקציה של $\Delta\ell$.

ד. על סמך הגרף ששרטטת ועל סמך הקשר שקיבלת בסעיף הקודם חשב את:

1) קבוע הקפיץ.

2) מסת הגוף.

ה. קבע מה מייצגת נקודת החיתוך של הגרף עם הציר האופקי? הסבר.

ו. חשב את המתיחות בחוט 3 (ראה תרשים) כאשר התארכות הקפיץ היא:

1) 0.2m.

2) 0.4m.

4. כוח החיכוך

.20

א. באילו מקרים פועל כוח חיכוך בין גוף ובין המשטח עליו מונח הגוף?

ב. מהו כיוון כוח החיכוך הפועל על הגוף במקרים שבהם פועל על הגוף כוח חיכוך.

ג. מהו כוח התגובה לכוח החיכוך הפועל על הגוף מהמשטח עליו הוא מונח (במקרים שבהם פועל כוח חיכוך על הגוף)? הסבר.

ד. מהו מקור כוח החיכוך? הסבר.

.21

לגבי כל אחד משלושת המשפטים הבאים קבע אם הוא נכון או שאינו נכון:

א. כוח החיכוך בין גוף למשטח עליו מונח הגוף מופיע רק כאשר הגוף נמצא בתנועה על המשטח.

ב. כוח החיכוך פועל רק על הגוף ואינו פועל על המשטח.

ג. כוח החיכוך פועל על הגוף וגם על המשטח כזוג של כוחות אינטראקציה המקיימים את החוק השלישי של ניוטון.

.22

א. מנה מקרים שמראים את חשיבות ונחיצות כוח החיכוך.

ב. מנה מקרים שבהם כוח החיכוך אינו רצוי.

4.1. כוח החיכוך הסטטי

.23

א. הגדר חיכוך סטטי.

ב. מהם הגורמים המשפיעים על גודלו של החיכוך הסטטי המקסימלי?

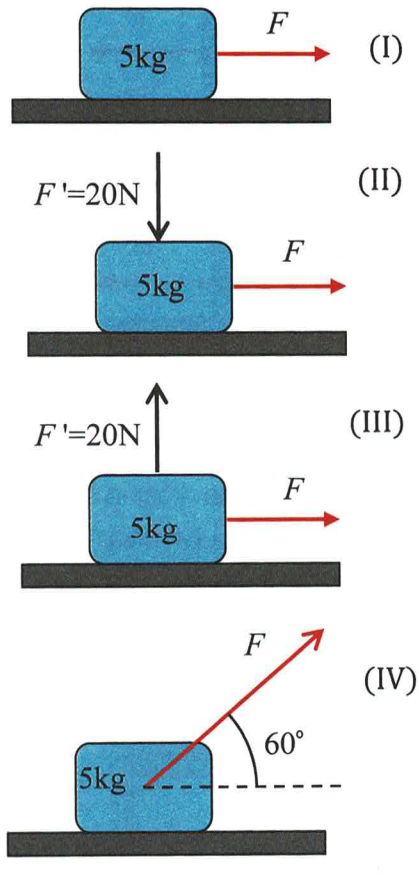
ג. רשום את המשוואה לחישוב החיכוך הסטטי המקסימלי ($f_{s\max}$).

ד. מדוע כוח החיכוך הסטטי המקסימלי

הפועל על גוף מסוים תלוי בגודלו של הכוח הנורמלי N הפועל הגוף ולא בגודלו של כוח הכובד F_G שפועל על הגוף.

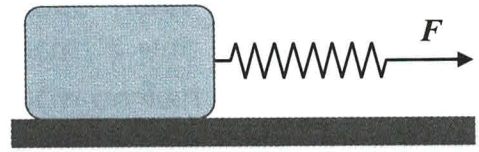
.24

במקרים המוצגים לפניך חשב את גודלו של הכוח F על מנת שהגוף יהיה על סף תנועה. בכל המקרים נתון שמסת הגוף היא 5kg ושמקדם החיכוך הסטטי הוא 0.8.



.25

גוף שמסתו 4kg מונח על משטח אופקי לא חלק. קושרים קצה קפיץ שקבוע הקפיץ שלו $480\,\text{N/m}$ לגוף ומושכים בקצה האחר שלו בכוח ההולך וגדל בהדרגה וכך שהקפיץ נמצא במצב אופקי (ראה תרשים).



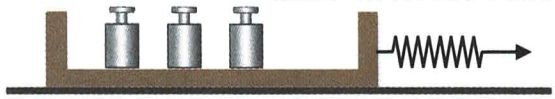
נתון שמקדם החיכוך הסטטי בין הגוף למשטח הוא 0.6.

א. חשב את התארכות הקפיץ שעבורה הגוף יהיה על סף תנועה.

ב. חשב את גודלו של כוח החיכוך הסטטי הפועל על הגוף כאשר התארכות הקפיץ שווה למחצית ההתארכות שחישבת בסעיף הקודם.

.26

על מנת למדוד את מקדם החיכוך הסטטי בין קופסה שמסתה M המונחת על משטח אופקי ובין המשטח עליו היא מונחת ביצע תלמיד את הניסוי הבא:



הוא חיבר לקופסה קצה קפיץ שקבוע הקפיץ שלו הוא $40\,\text{N/m}$. לאחר מכן הוסיף לקופסה משקולת שמסתה $m_0=100\,\text{g}$, ומשך בקצה החופשי של הקפיץ בכיוון אופקי בכוח שהלך וגדל בהדרגה עד למצב שבו הקופסה הייתה על סף תנועה. במצב זה התלמיד מדד את התארכות הקפיץ $(\Delta\ell_{\max})$. התלמיד חזר על אותה פעולה מספר פעמים, ובכל פעם שהוסיף משקולת נוספת בת $100\,\text{g}$ לקופסה, רשם את ההתארכות המקסימלית שבה הקופסה הייתה על סף תנועה $(\Delta\ell_{\max})$ ואת מספר המשקולות בקופסה (n).

בטבלה המוצגת לפניך מוצגים התוצאות שקיבל התלמיד: $\Delta\ell_{\max}$ כפונקציה של n:

$\Delta\ell_{\max}\,(\text{m})$	n
0.11	1
0.12	2
0.13	3
0.14	4
0.15	5
0.16	6
0.17	7
0.18	8

א. שרטט גרף המתאר את $\Delta\ell_{\max}$ כפונקציה של n.

ב. הסתמך על חוקי הפיזיקה וכתוב את הקשר המתמטי המתאר את $\Delta\ell_{\max}$ כפונקציה של n. העזר בפרמטרים M (מסת הקופסה הריקה) ו-μ_s (מקדם החיכוך הסטטי).

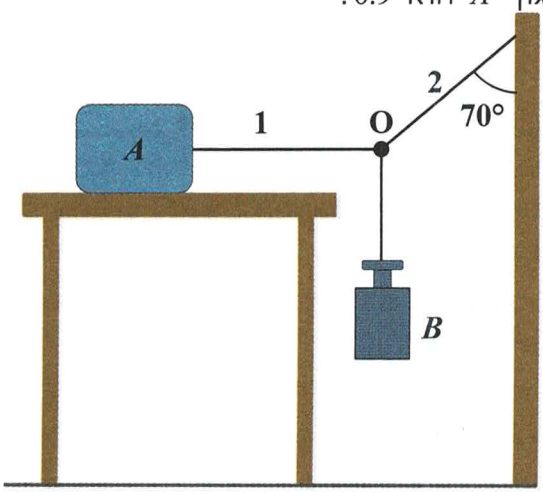
ג. בעזרת הגרף ששרטטת והביטוי המתמטי

שקיבלת חשב את:

1) מקדם החיכוך הסטטי בין הקופסה למשטח.
2) מסת הקופסה.

.27

במערכת המוצגת לפניך נתון שמסת הגוף A היא 8kg, ושהמשטח עליו מונח גוף זה אינו חלק, כך שמקדם החיכוך הסטטי בין המשטח לגוף A הוא 0.9.



נתון שהגוף A במצב המתואר בתרשים נמצא על סף תנועה, והחוט 1 הקשור לגוף זה נמצא במצב אופקי.

א. חשב את המתיחות בחוט 2 (ראה תרשים).
ב. חשב את מסתו של הגוף B.
ג. חשב את גודלו של החיכוך הסטטי הפועל על הגוף A כאשר מסת הגוף B שווה למחצית המסה שחישבת בסעיף הקודם.

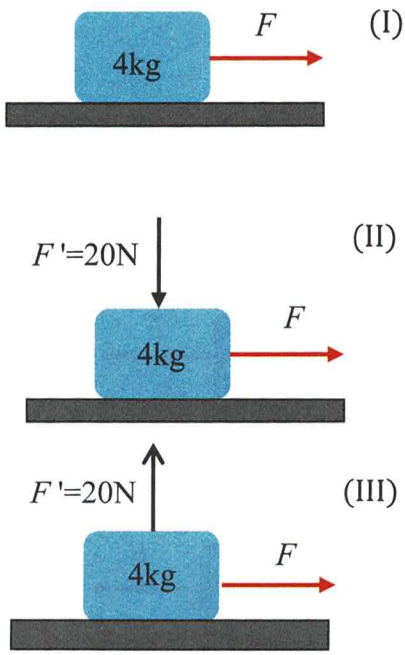
4.2. כוח החיכוך הקינטי

.28

א. הגדר כוח חיכוך קינטי.
ב. מהן תכונות כוח החיכוך הקינטי.
ג. מהם הגורמים המשפיעים על גודלו של כוח החיכוך הקינטי? רשום את המשוואה לחישוב גודלו של החיכוך הקינטי המופעל על הגוף על ידי המשטח עליו הוא נע.

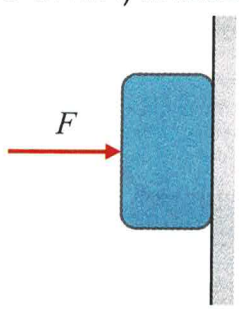
.29

באיור שלפניך מתוארים שלושה מצבים של גוף שמסתו 4kg הנע בהשפעת כוח אופקי F על גבי משטח לא חלק. מקדם החיכוך הקינטי זהה בשלושת המצבים: 0.4. חשב את כוח החיכוך הקינטי בכל אחד משלושת מצבי הגוף.



.30

מניחים גוף שמסתו 3kg על קיר אנכי לא חלק ומפעילים עליו כוח F בניצב לקיר כך שהגוף נשאר במנוחה (ראה תרשים).



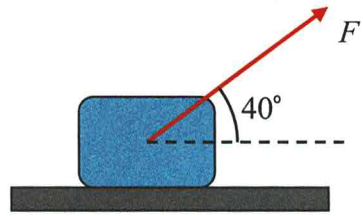
נתון שמקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף לקיר הם 0.5 ו-0.4, בהתאמה.

א. חשב את גודלו המינימלי של הכוח F $\left(F_{\min}\right)$, על מנת שהגוף יישאר על הקיר האנכי במנוחה.
ב. מצא את גודלו וכיוונו של כוח החיכוך הסטטי הפועל על הגוף כאשר גודלו של הכוח F שווה ל-$2F_{\min}$, כאשר $F_{\min}$ הוא הכוח שחישבת בסעיף הקודם.
ג. מקטינים את הכוח F בהדרגה עד שהגוף מתחיל להחליק על הקיר האנכי. חשב מה צריך להיות גודלו של הכוח F

על מנת שהגוף יחליק במהירות קבועה.

.31

בתרשים שלפניך מתואר גוף שמסתו 10kg המונח על משטח אופקי לא חלק. כוח F שגודלו 50N והיוצר זווית בת 40° עם המשטח פועל על הגוף, וגורם לו לנוע על המשטח במהירות קבועה (ראה תרשים).



א. חשב את גודלו של כוח החיכוך הקינטי הפועל על הגוף.
ב. חשב את גודלו של הכוח הנורמלי הפועל על הגוף.
ג. חשב את מקדם החיכוך הקינטי בין הגוף למשטח.

5. בעיות בחוק הראשון של ניוטון על מישור משופע

.32

מניחים גוף שמסתו 3kg על מישור משופע שזווית השיפוע שלו 30°. מקדמי החיכוך הסטטי והקינטי בין הגוף והמשטח הם 0.7 ו- 0.4, בהתאמה.

א. חשב את הכוח הנורמלי הפועל על הגוף.
ב. חשב את כוח החיכוך הסטטי המקסימלי שיכול לפעול בין הגוף והמשטח.
ג. הראה שהגוף נשאר במנוחה על המישור המשופע.
ד. חשב את גודלו של כוח החיכוך הסטטי הפועל על הגוף.

.33

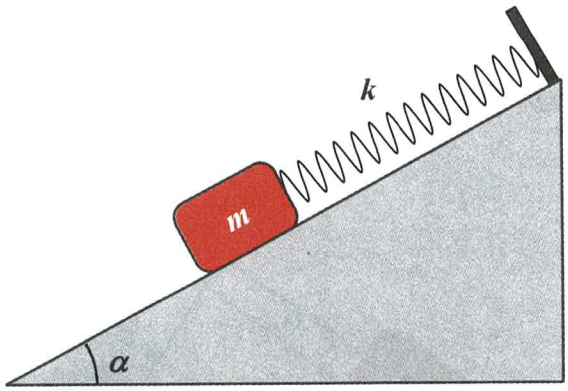
מחזיקים גוף שמסתו 2kg במנוחה על מישור משופע לא חלק.

נתון שזווית השיפוע של המישור המשופע היא 40°, ומקדם החיכוך הסטטי בין הגוף למשטח הוא 0.8.

א. הראה שהגוף מתחיל לנוע כאשר משחררים אותו.
ב. מצא את גודלו ואת כיוונו של הכוח F שצריך להפעיל על הגוף בכיוון המקביל למישור המשופע על מנת שהגוף יישאר במנוחה על המישור המשופע וכך שכוח החיכוך הפועל עליו יתאפס.
ג. חשב את גודלו המקסימלי של הכוח F $(F_{\max})$, שיש להפעיל על הגוף בכיוון מעלה המישור המשופע ובמקביל לו, וכך שהגוף יישאר במנוחה.
ד. חשב את גודלו המינימלי של הכוח F $(F_{\min})$, שיש להפעיל על הגוף בכיוון מעלה המישור המשופע ובמקביל לו, וכך שהגוף יישאר במנוחה.
ה. קבע מהו תחום הערכים של הכוח F המופעל על הגוף בכיוון מקביל למישור המשופע, שעבורו הגוף נמצא במנוחה.

.34

בתרשים שלפניך מתואר קפיץ שקבוע הקפיץ שלו k, הקשור בקצה אחד למוט המקובע על מישור משופע, והקצה האחר שלו קשור לגוף שמסתו m המונח על המישור המשופע.



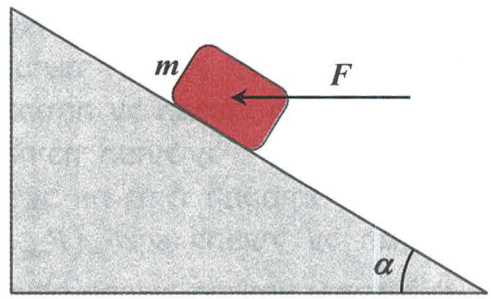
נתון שהמשטח חלק, שזווית השיפוע שלו α ושהקפיץ במצב המתואר בתרשים מקביל למישור המשופע.

א. הוסף לתרשים חיצים המייצגים את הכוחות הפועלים על הגוף. ליד כל חץ ציין את שם הכוח.
ב. מצא את התארכות הקפיץ. בטא את תשובתך באמצעות הגדלים, m, k ו- α.

.35

בתרשים שלפניך מתואר גוף שמסתו m המונח על מישור משופע חלק שזווית השיפוע

שלו α.



על הגוף פועל כוח אופקי בכיוון המתואר בתרשים כך שהגוף נמצא במנוחה.

א. ציין באמצעות חיצים את כיוון הכוחות הפועלים על הגוף, ורשום ליד כל חץ את שם הכוח.

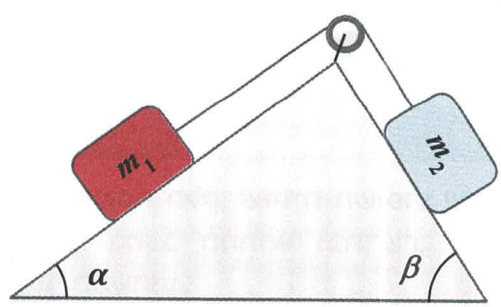
ב. בחר במערכת צירים מתאימה, ומצא את:

1) הכוח הנורמלי N. בטא את תשובתך בעזרת הגדלים m ו- α.

2) את הכוח F. בטא את תשובתך בעזרת הגדלים m ו- α.

36.

בתרשים שלפניך נתון שהמשטחים חלקים. מסת הגוף הראשון היא m_1 וזווית השיפוע של המישור עליו הוא מונח היא α, ומסת הגוף השני היא m_2 וזווית השיפוע של המישור עליו הוא מונח היא β.



נתון שהגופים נמצאים במנוחה.

א. חשב את היחס m_2/m_1. בטא את תשובתך באמצעות הזוויות α ו- β.

ב. נתון $\beta=50^\circ$, $\alpha=30^\circ$ ו- $m_1=2\,\text{kg}$.
חשב את:

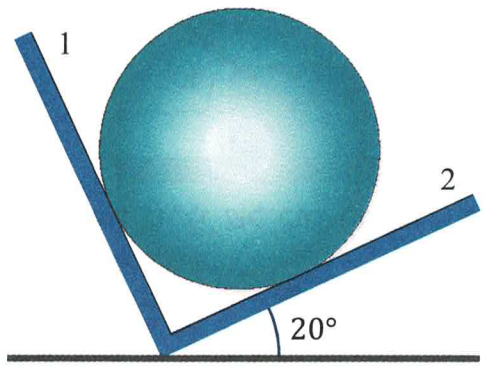
1) המסה m_2.

2) המתיחות בחוט המחבר את שתי המסות.

3) הכוח הממוצע שמפעילה הגלגלת על החבל הכרוך סביבה.

37.

כדור שמסתו $m=20\,\text{kg}$ נשען על שני מישורים 1 ו-2 הניצבים זה לזה, כפי שמתואר בתרשים שלפניך. אחד המישורים (מישור 2) יוצר עם הרצפה זווית בת 20°.



א. ציין את הכוחות הפועלים על הכדור. הצג כוחות אלה על ידי חיצים הפועלים על מרכז הכדור וליד כל חץ רשום את שם הכוח.

ב. בחר במערכת צירים מתאימה, וחשב את הכוחות שציינת בסעיף הקודם.